

**Commande à structure variable d'un actionneur
piézoélectrique associé à un microscope à effet tunnel**

N. Bonnail*, D. Tonneau*, F. Jandard*, H. Dallaporta* et G.A. Capolino**

* GPEC

Département de Physique
Faculté des Sciences de Luminy
case 901
F-13288 Marseille Cedex 09, France

** CREA

Université de Picardie Jules Verne
33 rue Saint Leu
F-80039 Amiens Cedex, France

tonneaul@gpec.univ-mrs.fr, Gerard.Capolino@sc.u-picardie.fr

Commande à structure variable d'un actionneur piézoélectrique associé à un microscope à effet tunnel

Nicolas Bonnail*, Didier Tonneau*, F. Jandard*
Hervé Dallaporta*, Gérard André Capolino**

* Faculté des Sciences de Luminy, GPEC
Département de Physique, Case 901,
13288 Marseille Cedex 09
tonneaul@gpec.univ-mrs.fr tél. 04 91 82 92 64

** Université de Picardie Jules Verne - CREA
33, rue Saint Leu - 80039 Amiens Cedex
Gerard.Capolino@sc.u-picardie.fr

Résumé : Les céramiques piézoélectriques permettent un contrôle de déplacements linéaires avec une sensibilité nanométrique non atteignable avec les systèmes mécaniques conventionnels.

Ce travail présente l'implantation d'une Commande à Structure Variable (CSV) pour le pilotage de la céramique piézoélectrique d'un microscope à effet tunnel. L'élongation de l'actionneur est obtenue à partir de la mesure du courant tunnel circulant entre une pointe-sonde fixée à l'extrémité de la céramique et une surface conductrice polarisée, placée perpendiculairement à la pointe. La grande sensibilité du courant tunnel avec la distance pointe-échantillon permet de contrôler des élongations dans le domaine du nanomètre. La modélisation et l'identification du système ont permis d'en déterminer les variables pertinentes pour l'implantation de la commande. La validation expérimentale de cette commande a été effectuée en étudiant sa réponse en poursuite et en régulation, et en comparant ses performances avec celles d'un correcteur intégral conventionnel, utilisé classiquement dans les électroniques de pilotage commerciales.

Mots clés -- Actionneurs piézoélectriques, Commande à Structure Variable, Microscope à effet tunnel, Nanotechnologie.

I. INTRODUCTION

Les céramiques piézoélectriques sont aujourd'hui couramment utilisées dans les systèmes de déplacement rectiligne lorsqu'une résolution sub-micronique est recherchée. Ces céramiques constituent l'élément essentiel des microscopes en champ proche (AFM, STM) [1], utilisés pour la visualisation de surfaces sur des fenêtres d'observation ajustables entre 1 nm^2 et $100 \mu\text{m}^2$. Le principe de fonctionnement de ces microscopes est basé sur la mesure et le contrôle d'une interaction entre une pointe-sonde de faible rayon de courbure (10-100 nm) et la surface à étudier. La pointe est fixée à un ensemble d'actionneurs piézoélectriques permettant son déplacement parallèlement et perpendiculairement au plan de l'échantillon.

Dans la microscopie à effet tunnel (STM), l'interaction mesurée est le courant tunnel circulant entre la pointe et la surface, lorsque l'apex de la pointe est approchée à une distance de l'ordre de 1 nm de la surface

polarisée. Dans le cas de la microscopie à force atomique (AFM), l'interaction contrôlée est la force d'attraction pointe-échantillon. La pointe sonde est placée à l'extrémité d'un bras de levier de faible raideur (quelques N.m^{-1}) dont on détecte la déflexion par voie optique.

Les électroniques de pilotage de microscope en champ proche comportent donc un capteur pour la mesure de l'interaction et d'une boucle de régulation de cette interaction. Les régulations commerciales couramment utilisées sont essentiellement basées sur l'utilisation d'un correcteur PI dont le réglage empirique par l'opérateur nuit à la reproductibilité du procédé d'imagerie. Ces microscopes étant pressentis pour être utilisés par l'industrie de la micro-électronique comme outil de lithographie à haute résolution pour l'élaboration de dispositifs électroniques de la prochaine génération, il est important d'en améliorer les performances. La réalisation de ces dispositifs de taille nanométrique nécessite de maintenir l'intégrité de la pointe en évitant tout contact avec la surface [2].

Le but de cet article est de présenter les avantages d'une commande à structure variable (CSV) implantée sur un microscope à effet tunnel commercial. Cette commande a été réalisée à partir de la connaissance d'un modèle du système, établi à partir de son identification [3]. Le concept de commande d'un STM par CSV a été validé en mesurant la réponse du système régulé à un échelon de la valeur de consigne.

II. PRESENTATION D'UN MICROSCOPE A EFFET TUNNEL

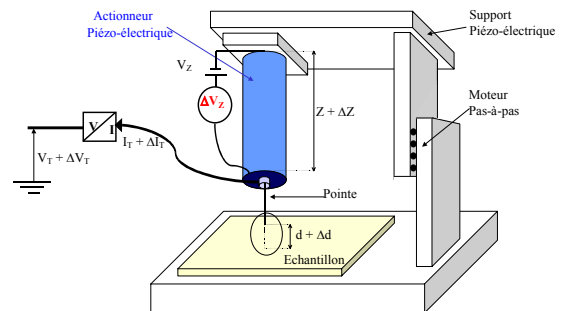


Figure 1 : Schéma d'un STM.

Le principe du STM repose sur la mesure et le contrôle du courant tunnel I_T apparaissant entre une pointe sonde et la surface à étudier, lorsque la pointe est approchée de la surface, polarisée à une tension V_S , à une

distance d de l'ordre du nanomètre. Le courant tunnel est mesuré à l'aide d'un capteur consistant en un convertisseur courant tension de haut gain (10^8 V/A) relié à la pointe du STM et dont la sortie V_T est l'image du courant tunnel. La pointe sonde est fixée à une céramique piézoélectrique z permettant la commande de son déplacement perpendiculairement à la surface (figure 1) avec une sensibilité de l'ordre de 0,01 nm. Le courant tunnel varie de façon exponentielle avec la distance pointe-échantillon et nous est donnée par la relation [4] :

$$I_T = SK\Phi(d)^{1/2} \frac{V_s}{d} \exp[-A\Phi(d)^{1/2}d] \quad (1)$$

avec :

S surface caractéristique du système pointe-surface,
 K et A sont des constantes,

Φ est le travail de sortie des électrons, fonction non linéaire qui dépend des propriétés électroniques et géométriques des matériaux en regard (pointe, surface).

La dépendance exponentielle du courant tunnel avec la distance pointe-échantillon assure la sensibilité de la mesure. Cet ensemble est positionné sur une autre céramique permettant le déplacement de la pointe dans le plan $[x, y]$ de la surface. Une cartographie 'iso-courant' est obtenue en mesurant en chaque point de la surface, la tension de commande V_z à appliquer à l'actionneur piézoélectrique z pour maintenir le courant tunnel à une valeur de consigne I_T^* fixée par l'opérateur. La connaissance de l'étalement de la céramique piézoélectrique ($\Delta z = f(V_z)$) permet de remonter à la topographie de la surface.

Dans la suite nous nous attacherons à l'étude de la boucle de régulation du courant tunnel. Celle ci comporte la céramique piézoélectrique (actionneur), un ensemble pointe convertisseur courant-tension (capteur) dont la sortie est l'image de la distance pointe-échantillon.

III. MODELISATION ET REPRESENTATION D'ETAT DU SYSTEME

A. Modélisation

La modélisation de la céramique piézoélectrique a été réalisée en utilisant un schéma électromécanique équivalent de Mason [5] (figure 2). La partie gauche du schéma fait apparaître deux ensembles distincts reliés par un transformateur de facteur de conversion N . La résistance R_d et le condensateur de capacité C_d , placés en parallèle avec l'entrée du transformateur, sont les caractéristiques diélectriques de la céramique. Le mouvement de l'extrémité libre de l'actionneur est modélisé par un circuit résonnant (R_1, L_1, C_1) qui tient compte de la résonance et de l'antirésonance de la céramique. La tension aux bornes du condensateur C_1 est l'image du déplacement linéaire de la l'extrémité libre de la céramique.

La pointe, constituée d'un fil de platine de 125 μm de diamètre maintenu à une extrémité, peut être assimilée à une poutre encastrée à une de ses extrémités. Nous avons montré que tout mouvement de l'extrémité libre de la

céramique excite un mode de vibration propre de la pointe, dans un plan perpendiculaire à celui de la surface [6, 7]. Le circuit (R, L, C) de la partie droite de la figure 2 permet de tenir compte de cette vibration supplémentaire. La somme des deux tensions V_C et V_{C1} est l'image du déplacement de l'extrémité libre de la pointe.

B. Représentation d'état du système

Nous sommes en présence d'un système composé de deux sous-systèmes multivariables en cascade, l'un d'ordre 3 (la céramique piézoélectrique), l'autre d'ordre 2 (oscillations de la pointe). La loi du courant tunnel est une loi non linéaire. Nous n'en tiendrons pas compte pour la modélisation de notre système. Elle sera intégrée par la suite dans la matrice de sortie comme un gain non linéaire. Le système global est donc d'ordre cinq. Le vecteur d'état associé est donc composé de cinq variables :

- U_{Cd} tension aux bornes du condensateur C_d ,
- U_{C1} tension aux bornes du condensateur C_1 ,
- I_{L1} courant traversant la bobine L_1 ,
- U_C tension aux bornes du condensateur C ,
- I_L courant traversant la bobine L .

Le vecteur d'entrée U est de dimension 1, composé de la tension de commande appliquée à la céramique piézoélectrique. Le vecteur de sortie contient la distance pointe-surface (D). Le système ainsi décrit précédemment est inobservable. En effet, les modes de vibrations de la céramique piézoélectrique ne sont pas accessibles. Afin de rendre notre système observable il faut effectuer une mesure complémentaire sur le système amont. Cette mesure doit être réalisée sans avoir à effectuer de modifications sur l'architecture générale du microscope à effet tunnel et sans perturber le système global. Ceci permettra de généraliser cette méthode à tout type de microscope à effet tunnel, voire plus généralement à tous les types de microscopes en champ proche. Pour cela, nous avons réalisé la mesure du courant I_p délivré par la commande. Cette mesure correspond au courant de polarisation de la céramique piézoélectrique. Cette mesure rend observable les modes de vibrations de la céramique. Cette opération rend observable le système global. Le vecteur de sortie est finalement de dimension 2 : $[I_p D]^T$.

La mise sous forme de représentation d'état du système donne finalement (2) :

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_d \\ \dot{U}_{C1} \\ \dot{I}_{L1} \\ \dot{U}_C \\ \dot{I}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(R_c + R_d) \times C_d} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_1} & 0 & 0 \\ \frac{N R_c}{(R_c + R_d) \times L_1} & -\frac{1}{L_1} & -\frac{R_1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} \\ 0 & \frac{C_1}{L} & 0 & -\frac{1}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_d \\ U_{C1} \\ U_C \\ I_{L1} \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{(R_c + R_d) \times C_d} \\ 0 \\ \frac{N R_d}{(R_c + R_d) \times L_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times U$$

$$\begin{bmatrix} I_p \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(R_c + R_d) \times C_d} & 0 & N & 0 & 0 \\ 0 & C_1 & 0 & C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_d \\ U_{C1} \\ U_C \\ I_{L1} \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{R_c + R_d} \\ 0 \end{bmatrix} \times U \quad (2)$$

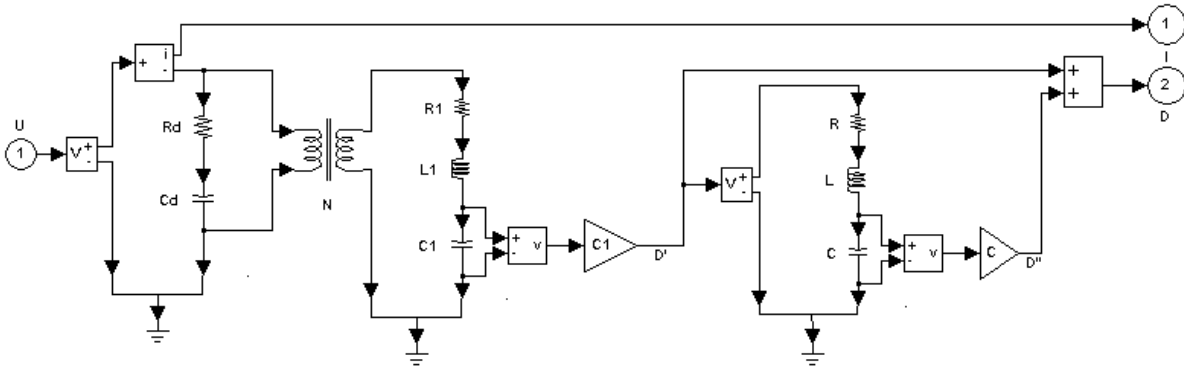


Figure 2 : Schéma électromécanique équivalent du système 'céramique piézoélectrique-pointe'.

Remarque : le temps de réponse de la céramique piézoélectrique étant de 20 μ s, on ne peut espérer mesurer l'évolution du courant de polarisation en utilisant une fréquence d'échantillonnage de 50 kHz. Pour résoudre ce problème, nous avons volontairement augmenté la constante de temps du système par adjonction d'une résistance Rc. Pour des valeurs de résistance de 0 à 20 k Ω le temps de réponse de la céramique piézoélectrique varie entre 20 μ s à 110 μ s.

Les valeurs de R_1 , L_1 et C_1 ont été déterminées à partir de l'analyse fréquentielle de la réponse en courant I_p circulant à travers la céramique piézoélectrique sous excitation. L'amplitude du signal d'excitation a été fixée à 50 mV, valeur typique des variations de tension reçues par la céramique pendant l'imagerie en microscopie à effet tunnel. Une résonance et une anti-résonance ont été observées à 19,5 kHz et 19,73 kHz respectivement. Les caractéristiques diélectriques (R_d , C_d) associées à la céramique ont été mesurées en étudiant la réponse du courant I_p lorsque la céramique est soumise à un échelon de tension de 50 mV. Le temps de réponse est de 7,3 μ s et le maximum de courant est de 22 μ A. Les valeurs de R, L, C sont beaucoup plus difficiles à déterminer et une procédure d'identification originale a dû être imaginée et mise en œuvre dans ce but [6, 7].

IV. CORRECTION

A. Architecture de la boucle de régulation en altitude

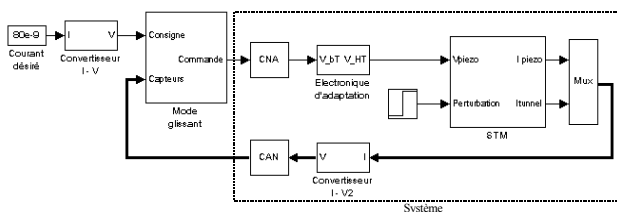


Figure 3 : Schéma-bloc de l'ensemble de la boucle de régulation d'un STM.

L'implantation de la correction a été réalisée sur une carte de calcul ayant un processeur de traitement du signal (DSP). L'application des tensions de commande sur la céramique piézoélectrique est réalisée par

l'intermédiaire de convertisseurs numérique analogique (CNA) et d'une électronique d'adaptation afin d'amplifier les signaux (les tensions appliquées à la céramique piézoélectrique sont comprises entre ± 150 V). Le signal de commande est alors appliqué au microscope à effet tunnel. Les courants tunnel et piézoélectrique sont mesurés par l'intermédiaire de convertisseur courant tension à fort gain (10^8 V/A et 10^5 V/A) et des convertisseurs analogique numérique (CAN) (Figure 3) [8].

B. Etude de la boucle de régulation

Quand la pointe est en condition tunnel, la boucle de régulation doit en permanence corriger la position de la pointe afin de garder la valeur du courant tunnel à la valeur de consigne désirée. Différents types de perturbations peuvent faire fluctuer le courant tunnel :

- Le balayage de la surface engendre des fluctuations de la distance pointe échantillon.
- Dans le cas d'une surface inhomogène, le courant tunnel dépend des états électroniques locaux de surface de l'échantillon.
- Les dérives thermiques de la céramique piézoélectrique, de la mécanique de maintien, de l'actionneur et du porte échantillon sont aussi à prendre en compte.

La commande doit donc réagir très rapidement à toute perturbation. C'est la raison pour laquelle notre choix s'est porté sur un mode de réglage à structure variable [9] dont le schéma-bloc est donné figure 4.

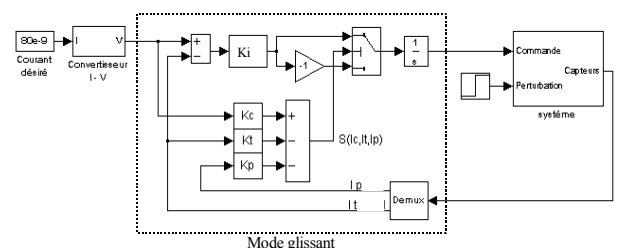


Figure 4 : Description de la loi de commande.

C. Commande Implantée

La Commande à Structure Variable (CSV) mise en place repose sur le fait que le courant tunnel est l'image du déplacement de la céramique piézoélectrique et que le courant piézoélectrique est l'image de sa vitesse de déplacement. Une loi de commutation dans l'espace I_t (courant tunnel) – I_p (courant piézoélectrique) peut alors être choisie :

$$S(I_t, I_p) = K_c I_c - K_t I_t - K_p I_p \quad (3)$$

avec :

I_c : Consigne désirée

K_c , K_t et K_p : des constantes de paramétrages

La structure du régulateur est une structure classique d'asservissement en position avec une correction intégrale (figure 4). La loi de commutation S vient en fonction de son signe mettre la boucle de régulation en contre-réaction positive ou négative suivant la loi :

$$\begin{cases} S(I_t, I_p) > 0 & U = U^* \\ S(I_t, I_p) < 0 & U = -U^* \end{cases} \quad (5)$$

avec :

U^* : signal de commande en sortie du correcteur.

L'intérêt de cette structure réside dans le fait qu'elle ne nécessite pas d'observateur. Elle n'est donc pas tributaire des paramètres du système. Sa transposition à un autre microscope à effet tunnel ou plus généralement à un microscope en champ proche est réalisable facilement. Le choix d'une CSV avec commutation d'une contre-réaction variable permet d'obtenir un phénomène transitoire stable et bien amorti même si les deux contre-réactions donnent un comportement instable ou à la limite de la stabilité [10]. De plus, cette structure n'implique pas un cycle limite en régime permanent contrairement à la CSV avec commutation au niveau de l'organe de commande (Commutation entre deux valeurs constantes, U_{max} et U_{min}). On obtient alors un état de sortie non oscillant en régime permanent.

Notons qu'une commande à structure variable a été testée sur des céramiques piézoélectriques pour des actionneurs rotatifs [11].

D. Résultats et discussion

L'étude de la Commande à Structure Variable a été réalisée en plaçant le système en limite de stabilité en augmentant le gain du correcteur intégral ($K_i = 130$). Ce gain restera par la suite constant dans toutes les mesures présentées sauf mention contraire.

Dans le cas d'une étude de la régulation, la réponse du système à une perturbation doit être réalisée. Nous avons préféré évaluer les performances de la boucle de régulation dans le cas d'une poursuite de la valeur de consigne, pour éviter le caractère aléatoire d'une perturbation classique. Les réponses du système ont été calculées et mesurées pour des changements de la valeur de consigne du courant tunnel sous forme d'échelon de 10 nA à 20 nA.

Afin de mettre en évidence l'influence de la CSV sur la boucle d'asservissement, nous avons déterminé la réponse du système avec correction intégrale sans intervention de la loi de commutation de la CSV (figure 5). La réponse met en évidence des oscillations amorties dues au fort gain du correcteur intégral. Un dépassement de la valeur de consigne est aussi observé. Le fait de dépasser la valeur de consigne du courant tunnel signifie une diminution de la distance pointe-échantillon, ce qui peut provoquer le contact et l'endommagement de la pointe [2]. Le temps de stabilisation de la boucle est de 2,2 ms. Cette réponse servira de référence afin d'évaluer les avantages de la CSV.

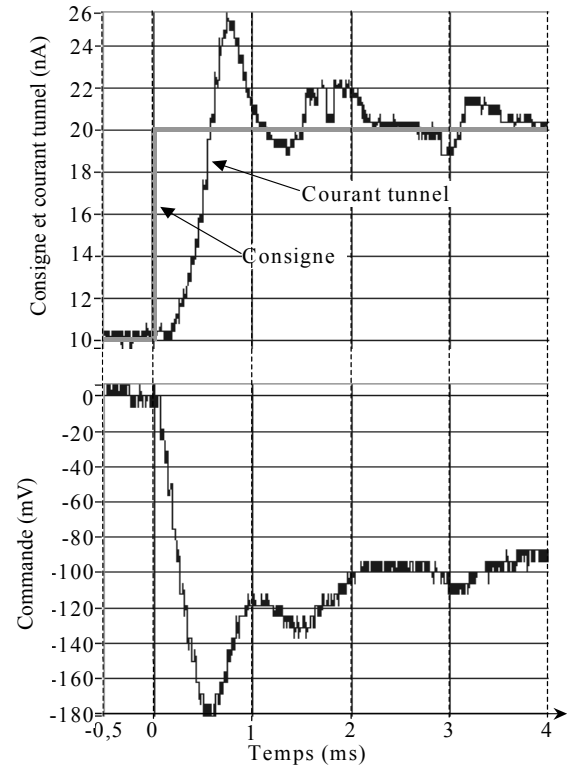


Figure 5 : Réponse en courant tunnel et commande associée de la boucle de régulation pour un changement de consigne de 10 nA à 20 nA sous forme d'échelon avec correcteur à action intégrale ($K_i = 130$).

Nous présentons par la suite deux résultats mettant en évidence la Commande à Structure Variable avec une CSV rapide (Figure 6) et une CSV lente (figure 7).

Pour le couple de paramètres K_t , K_p tels que $K_t/K_p=1/5$ (figure 6), La stabilisation du système est rapide (1,2 ms) comparée au correcteur I (2,2 ms) avec un nombre de commutations faibles dans la phase de poursuite 0-1,2 ms) et un nombre de commutations élevées dans la phase d'asservissement (1,2-4 ms). Aucun dépassement de la valeur de consigne n'est relevé.

La figure 7 met bien en évidence une CSV lente. Le ralentissement du système est réalisé en faisant commuter la structure plusieurs fois. On a alors un contrôle de la vitesse d'évolution du courant tunnel, phénomène qui peut être intéressant pour certaines applications en microscopie. Ces commutations rapides sont bien mises en évidence sur la représentation du signal de commande.

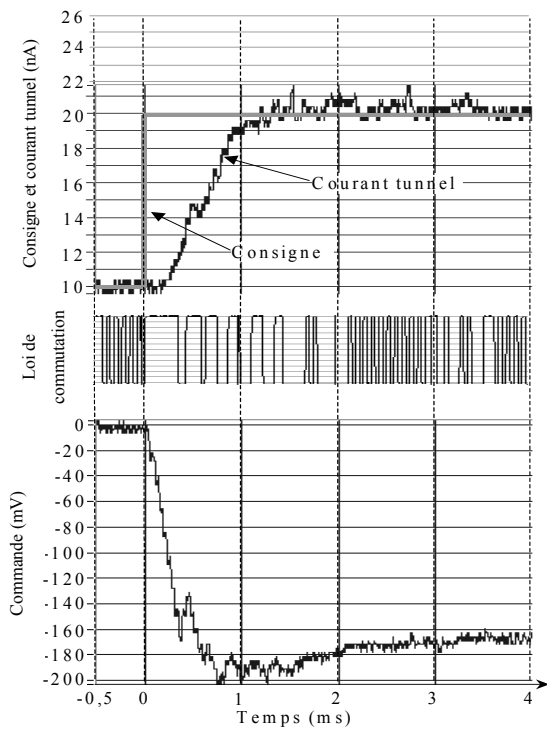


Figure 6 : Réponse réelle en courant tunnel, loi de commutation et commande associée de la boucle de régulation pour un changement de consigne de 10 nA à 20 nA sous forme d'échelon pour une CSV rapide ($K_c=K_t$, $K_t/K_p=1/5$)

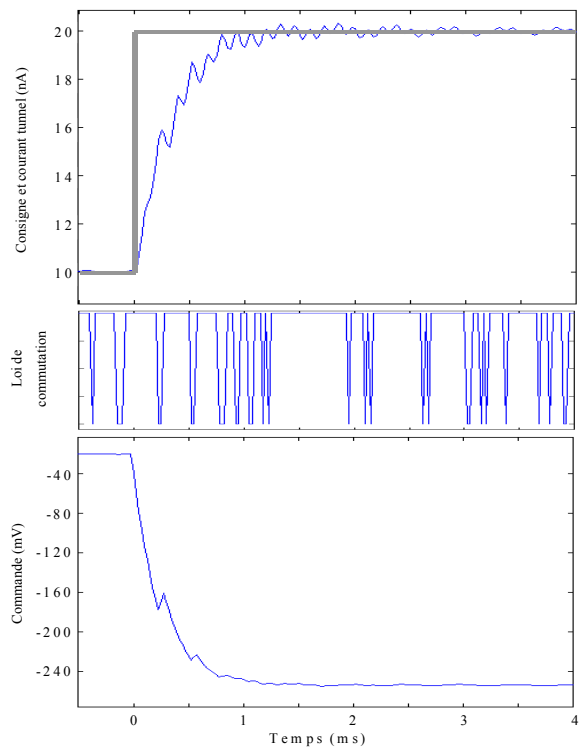


Figure 8 : Réponse simulée en courant tunnel, loi de commutation et commande associée de la boucle de régulation pour un changement de consigne de 10 nA à 20 nA sous forme d'échelon pour une CSV rapide ($K_c=K_t$, $K_t/K_p=1/5$)

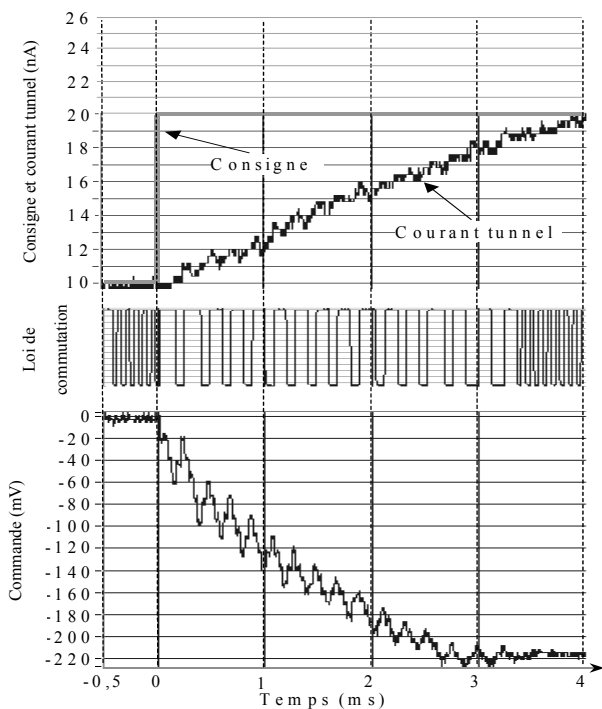


Figure 7 : Réponse réelle en courant tunnel, loi de commutation et commande associée de la boucle de régulation pour un changement de consigne de 10 nA à 20 nA sous forme d'échelon pour une CSV lente ($K_c=K_t$, $K_t/K_p=1/10$)

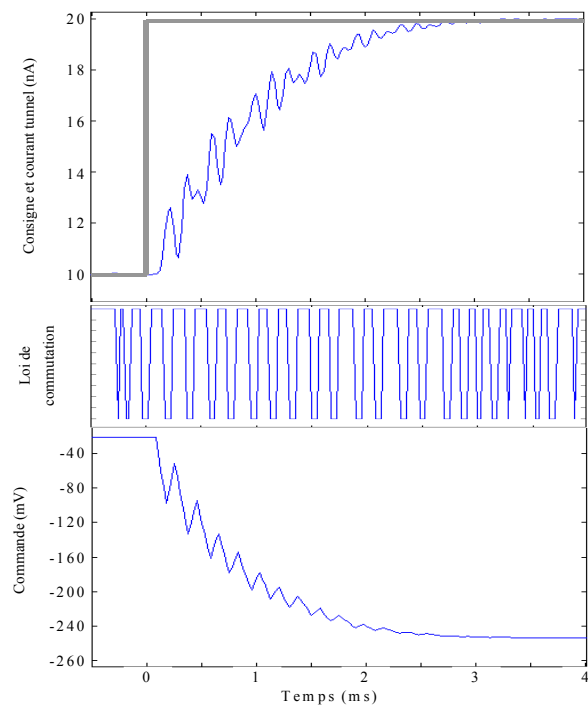


Figure 9 : Réponse simulée en courant tunnel, loi de commutation et commande associée de la boucle de régulation pour un changement de consigne de 10 nA à 20 nA sous forme d'échelon pour une CSV lente ($K_c=K_t$, $K_t/K_p=1/10$)

Afin d'évaluer notre modèle, nous avons comparé sa réponse en l'étudiant dans les deux cas de CSV présentés précédemment (figure 8 et figure 9). Les figures 6 (réelle) et 8 (simulation), correspondent à la CSV rapide, et les figures 7 (réelle) et 9 (simulation) à la CSV lente. Dans les deux cas de CSV, les allures des lois de commutation sont respectées. Aucun dépassement de la valeur de consigne n'est relevé. L'évolution de la réponse du système n'est cependant pas identique entre le cas réel et la simulation. En effet, en réel, l'évolution du courant tunnel est linéaire alors que dans la réalité son évolution est exponentielle. Ceci peut être dû au fait que notre modèle est d'ordre réduit. En effet, nous n'avons tenu compte dans notre modélisation que d'une résonance de la céramique piézoélectrique. Cette différence d'évolution peut expliquer la légère différence des temps de réponse entre les courbes expérimentales et simulées.

Afin d'étudier la robustesse de la C.S.V. mise en place, nous avons mis volontairement la boucle d'asservissement, avec correction à action intégrale, en oscillation en augmentant le gain proportionnel du correcteur I ($K_i = 400$). La boucle est alors très sensible à toute perturbation et entre facilement en oscillation (figure 10). L'activation de la CSV rend le système stable. L'opération inverse a été effectuée. La désactivation de la CSV et l'apparition d'une perturbation a mis en oscillation la boucle d'asservissement. Ceci met en évidence l'une des caractéristiques de la CSV à savoir : "Avec une loi de commutation adéquate, on peut obtenir un phénomène transitoire stable et bien amorti même si les deux contre-réactions donnent un comportement instable ou à la limite de la stabilité" [9].

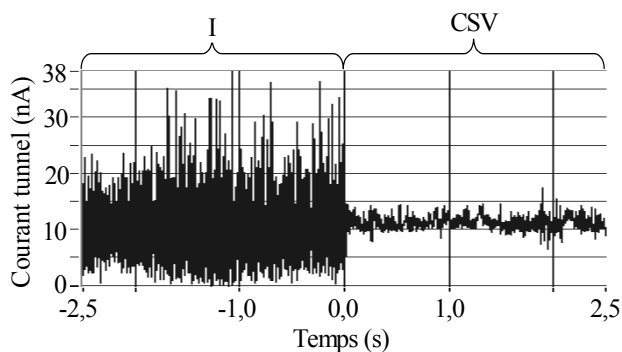


Figure 10 : Comparaison de la stabilité de la correction I et CSV pour un fort gain ($K_i=400$)

IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La modélisation d'un STM comprenant une céramique piézoélectrique et un capteur de position a permis de déduire une représentation d'état du système. Ce système d'ordre 5 a pour entrée la commande de la céramique piézoélectrique et pour sortie la distance pointe-échantillon. L'ajout au vecteur sortie de la mesure du courant circulant dans la céramique pendant la commande rend le système observable. L'implantation d'une commande à structure variable sur le STM par retour capteurs a pu être réalisée en effectuant les mesures des deux variables du vecteur

sortie définies. Cette commande a été validée par la mesure de la réponse en courant tunnel lors de l'application d'échelons de consigne. Dans certains cas la CSV permet de gagner un facteur 2 dans les temps de réponse (1,2 ms contre 2,2 ms) par rapport au correcteur I conventionnel. Nous montrons que l'ajout de la CSV permet de stabiliser le système placé à la limite d'instabilité et de supprimer les dépassements de consigne.

V. REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier la Société Test Innovation (Rousset-France) et le Conseil Régional de Provence Alpes Côte d'Azur qui ont financé cette étude (décision d'aide n° 9811/2270).

VI. BIBLIOGRAPHIE

- [1] BINNIG G., ROHRER H., GERBER Ch., WEIBEL E., Surface Studies by Scanning tunnelling Microscopy, *Phys. Rev. Lett.*, (49), 57, 1982.
- [2] TONNEAU D., CLEMENT N., HOUEL A., BONNAIL N., DALLAPORTA H., SAFAROV V., Proximal probe induced chemical processing for nanodevice elaboration. "Chemical Physics of Thin Film Deposition Processes for Micro and Nano-technologie" edited by Y. Pauleau, NATO ASI series, Kluwer Academic Publishers, Hollande, to be published.
- [3] BONNAIL N., « Modélisation du positionnement nanométrique de la pointe d'un microscope à effet tunnel. », JCGE, Nancy, 13-14 Novembre 2001.
- [4] KUK Y., *Scanning Tunneling Microscopy I*. Ed. by H.J. Günthererodt and R. Weisendanger, Springer Verlag, 1994.
- [5] PIECOURT E. «Caractérisation électromécanique et alimentation électrique des moteurs piézo-électriques», Thèse de Doctorat de l'I.N.P. Toulouse, 13 juillet 1995.
- [6] N. Bonnail, D. Tonneau, H. Dallaporta, A. Juan, G.-A. Capolino, F. Bernard, Proceeding of the ICEM2000 conference, Espoo (Finlande), August 2000, Vol. 3, 1338-1342, ISBN 951-22-5097-7
- [7] N. Bonnail, D. Tonneau, H. Dallaporta, G.-A. Capolino, Proceedings of the IEEE-IAS Annual Meeting, Rome Italy, 8-12 October 2000, vol.1, 293-298 (2000), ISBN 0-7803-6402-3.
- [8] BONNAIL N., TONNEAU D., DUMAS Ph., CAPOLINO G.-A., DALLAPORTA H., « Architecture d'une électronique de microscope en champ proche. Contrôle par DSP et interface utilisateur sous environnement LabviewTM. », C2I, Paris, 31 janvier-1 février 2001, Editions Hermès, vol. 2, pp. 431-438.
- [9] BÜHLER H. «Réglage par mode de glissement», Presses polytechniques romandes.
- [10] SIVERT A. «Commande à structure variable appliquée au positionnement d'une charge mécanique à forte variation paramétrique», Thèse de Doctorat de l'université de Picardie Jules Verne, 28 septembre 2000.
- [11] HWANG C.-L., JAN C., CHEN Y.-H., Piezomechanics using intelligent variable-structure control. *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 48, NO. 1, pp. 47-59, February 2001.