Réalisation d'un profilomètre optique : introduction à la microscopie à sonde locale

J.-M Friedt[1], Q. Le Masne[2], N. Coq[2], M. Myotte[2]
d'après une idée originale de C. Ferrandez (LPMO, Besançon, France)
[1]: IMEC, Kapeldreef 75, 3001 Leuven, Belgique
[2]: Lycée Pothier, 2Bis rue Marcel Proust, 45044 Orléans, France

J.-P. Vigneron *et al.* a récemment présenté un rapide tour d'horizon des microscopies à sondes locales (SPM, *Scanning Probe Microscopes* [1]). Nous proposons ici d'aborder ce même sujet d'un point de vue expérimental par la réalisation d'un profilomètre optique fonctionnant selon un principe similaire et nécessitant de résoudre les même problèmes que lors du développement d'un SPM.

Contrairement aux dispositifs d'imagerie les plus familiers tels que l'œil ou une caméra dans lesquels un grand nombre de capteurs identiques travaillent en parallèle (dans cet exemple les détecteurs d'intensité lumineuse), le microscope à sonde locale balaye une sonde unique en un grand nombre de points distincts dans l'espace et réalise ainsi une image de la propriété physique mesurée. Cette propriété peut être la distance sonde-échantillon (*via* le courant tunnel [2] ou la force appliquée sur une pointe [3]), le champ magnétique local [4], le courant électrochimique [5], la conductivité thermique ...

L'obtention d'un microscope à sonde local fonctionnel nécessite de résoudre les trois problèmes suivants :

- obtenir un capteur de distance sonde-surface possédant une plage de bijectivité aussi large que possible et un niveau de bruit aussi faible que possible pour atteindre une bonne résolution verticale
- obtenir un positionnement précis dans le plan de balayage de l'échantillon relativement à la sonde
- réaliser un logiciel permettant de déplacer l'échantillon par rapport à la sonde, et pour chaque nouvelle position lire la distance sonde-surface.

Nous suivrons ces étapes lors de la réalisation de ce profilomètre dont le principe de fonctionnement est très proche du microscope à force atomique (*atomic force microscope*, AFM). La principale étude porte sur l'utilisation d'une tête de lecteur de compact-disc (CD) comme capteur sonde-surface (où la sonde est la lentille de focalisation d'un laser). Le positionnement de l'échantillon est obtenu en le fixant sur une table traçante commandé numériquement, tandis que le logiciel commande les différents éléments de l'instrument.

La chronologie à suivre est donc:

- s'assurer que la tête de lecture récupérée fonctionne correctement, reconnaître le brochage de la diode laser et introduction au mode de fonctionnement de celle-ci (paragraphe 1)
- alimenter correctement la diode laser pour une utilisation prolongée stable (paragraphe 1.1) au moyen d'une rétroaction de la puissance lumineuse émise sur la tension d'alimentation

– capter le signal de distance entre le point focal du laser et un objet réfléchissant (paragraphe 1.2)
– alimenter l'électroaimant supportant la lentille de focalisation du laser de façon à déplacer le capteur de distance
– déplacer avec précision l'échantillon sous le capteur de distance de façon à imager la topographie de la surface (paragraphe 2)

1 La tête de lecteur CD

L'utilisation d'une tête de lecteur de CD semble devenir une alternative intéressante du fait de leur faible coût dans le développement de capteurs nécessitant une source laser et un photodétecteur (voir par exemple [6] pour le développement d'un DNA-chip basé sur un tel composant).

La tête d'un lecteur de CD comporte:
– une diode laser émettant dans le proche infrarouge, autour de 780 nm
– une lentille fixée à un bobinage utilisé comme électroaimant pour faire varier la position verticale de la lentille en faisant varier le courant circulant dans la bobine (figure 1)
– un photodétecteur multi-quadrants dont le traitement adéquat des signaux permet d'obtenir une relation bijective avec la distance lentille-surface.

D'après les données des fabriquants, le spot laser qui se réfléchit sur la surface après focalisation par la lentille convergente mobile a un diamètre de l'ordre du micromètre (1.7 μm).

Puisque nous allons utiliser les différents éléments de la tête laser dans la réalisation du profilomètre, une bonne compréhension du mode de fonctionnement de chaque partie est fondamentale : alimentation de la diode laser, des diodes de réception et finalement du bobinage de l'électroaimant.

1.1 Principe d'alimentation de la diode laser

La diode laser comporte une zone émettrice du laser et un photodétecteur intégré fournissant un signal électrique fonction de la puissance émise [7]. Étant donné que l'impédance de la diode émettrice baisse avec la température, et que la puissance émise croît avec le courant circulant dans la jonction, une alimentation à tension constante entraîne rapidement la destruction du composant.

Il faut donc développer une alimentation stabilisée en puissance émise (figure 3). Nous utilisons pour cela un amplificateur opérationnel dont la boucle de rétroaction stabilisante (entre la sortie et l'entée inverseuse) compare la tension issue du photodétecteur intégré (fonction de la puissance émise) à une tension de consigne. Si la puissance émise est trop importante, la tension issue du photodétecteur est supérieure à la tension de consigne, $\varepsilon = V_+ - V_- < 0$ et la tension de sortie de l'amplificateur opérationnel décroît. Le raisonnement

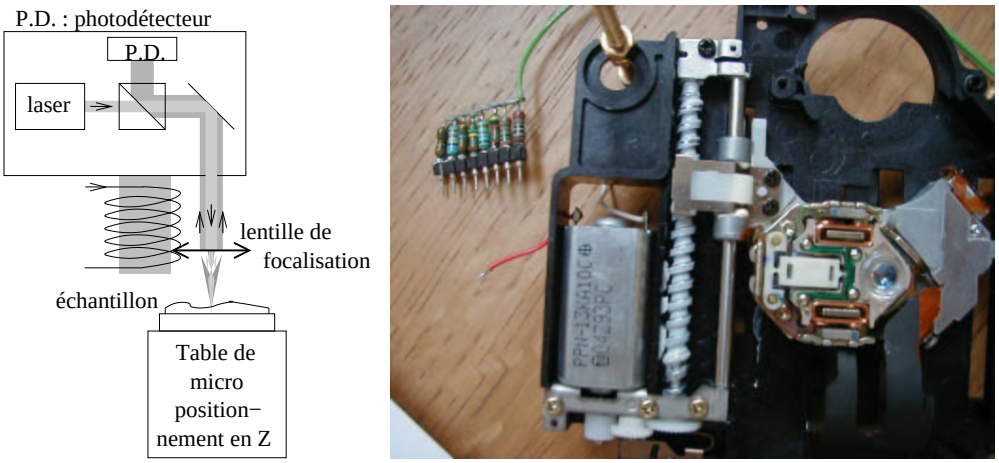

FIG. 1 – *La tête de lecteur de compact-disc : la distance entre la lentille et l'échantillon est ajustable en faisant varier le courant circulant dans la bobine de l'électroaimant auquel est fixée la lentille. Un photodétecteur quatre-quadrants renvoie une signal électrique fonction de la distance entre le point focal de la lentille et la surface réfléchissante de l'échantillon.*

inverse montre que si la puissance émise est insuffisante, la tension et donc l'intensité issue de l'amplificateur opérationnel croît.

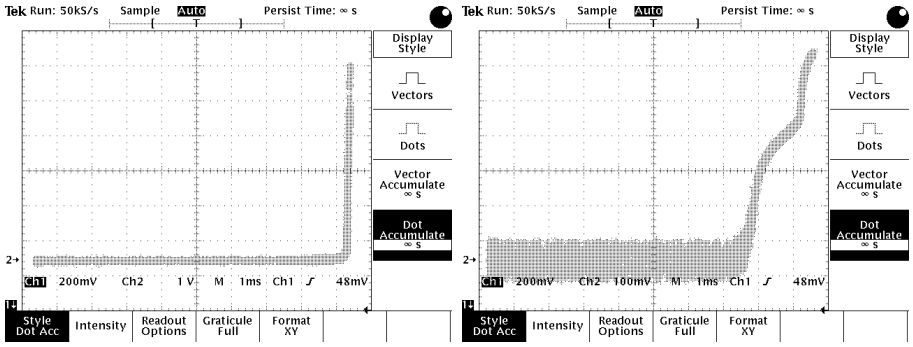

FIG. 2 – *Gauche : intensité laser lue par un photodétecteur externe placé sous la lentille de focalisation, en fonction de la tension d'alimentation. Droite : réponse du photodétecteur intégré à la diode laser en fonction de la tension d'alimentation.*

La diode se met soudainement à laser lorsque le courant d'alimentation atteint une valeur de l'ordre de 60 mA (figures 2 et 3, gauche). Ce courant ne peut être fourni directement par un amplificateur opérationnel : il faut donc ajouter en sortie un transistor monté en amplificateur de courant. Nous avons choisi d'utiliser un transistor de puissance 2N3055, largement surdimensionné, pour éviter les problèmes d'échauffement observés avec des transistors de plus petites dimensions. Le circuit d'alimentation du laser doit en effet pouvoir fonctionner de façon stable pendant plusieurs heures. Le transistor étant inclus

dans la boucle de rétroaction de l'amplificateur opérationnel, son ajout ne change rien au principe de fonctionnement du circuit d'alimentation de la diode laser.

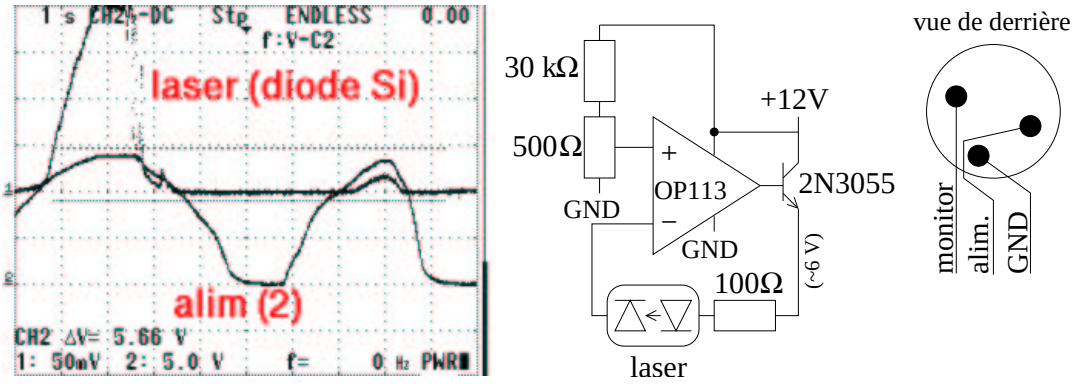

FIG. 3 – *Gauche : puissance laser émise (telle que observée par une diode silicium – Hamamatsu S3399 – placée sous la lentille) en fonction de la tension d'alimentation appliquée à la diode laser via une résistance de 100 Ω. Noter la croissance rapide de la puissance émise lorsque le courant seuil de l'ordre de 60 mA est atteint. Milieu : circuit électronique d'alimentation de la diode laser garantissant une puissance émise constante. L'objectif de ce circuit est de faire varier la tension issue de l'ampli-op (qui est en fait un quart d'OP413) pour que le signal issu du photodétecteur intégré à la diode laser soit égal à la tension de consigne présent sur la borne non-inverseuse. Droite : brochage de la diode laser.*

La tension de consigne nécessaire à une puissance laser raisonnable s'obtient en alimentant *très brièvement* la diode avec une source idéale de tension *via* un résistance de l'ordre de la centaine d'ohms. L'intensité émise par la diode est tout d'abord observée au moyen d'un photodétecteur externe placé sous la lentille de la tête de lecteur CD (un capteur CCD de webcam peut convenir à cette opération si l'on a pris soin de retirer un éventuel filtre bleu parfois utilisé pour empêcher la saturation du capteur par les infrarouges lors d'une utilisation normale). Une fois l'émission laser observée au moyen du photodétecteur externe, la tension issue du photodétecteur intégré est observée en faisant croître la tension d'alimentation de la diode laser : noter la valeur issue du photodétecteur lorsque l'émission laser est nettement visible sur le photodétecteur externe. Ce sera la valeur de consigne à intégrer dans le circuit décrit précédemment.

Le brochage de toutes les diodes laser testées au cours du développement de cette expérience était le même et présenté dans la figure 3. Noter qu'une erreur dans la connexion initiale de la diode laser conduira très certainement à sa destruction immédiate.

1.2 Utilisation du quadrant de photodiodes de réception

Lors de l'utilisation en lecture d'un disque, le quadrant de photodiodes intégré à la tête fonctionne de la façon suivante :

- un récepteur 4-quadrants mesure la focalisation du spot laser sur la surface réfléchissante

- deux récepteurs de part et d'autre du capteur 4-quadrants sont utilisés pour maintenir la tête au-dessus de la piste en cours de lecture.

Tous les photodétecteurs sont polarisés par une tension de +5 V pour augmenter leur vitesse de réponse à une fréquence de quelques megahertz (rappelons que 74 minutes de musique tiennent sur un disque de 650 MB, d'où la nécessité d'une bande passante d'au moins 1.2 Mb/s∼1.2 MHz).

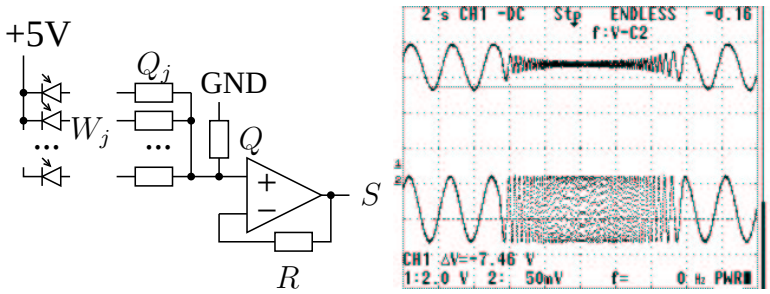

FIG. 4 – *Gauche : circuit utilisé pour combiner les signaux issus du photodétecteur multi-quadrants (noté "P.D." sur la figure 1 et symbolisé ici par les photodiodes définissant les W_j) après réflection du laser sur la surface de l'échantillon. Cette sortie est lue par un convertisseur analogique-numérique pour traitement. Droite : évolution du signal issu de la sommation des courants des quatre photodétecteurs de la tête de lecture (en bas) en fonction de la fréquence d'excitation de l'électroaimant (en haut) contrôlant la position de la lentille par rapport à l'échantillon. Une telle courbe permet d'estimer la bande passante et donc le temps de réponse de la tête de lecture lors d'une utilisation en boucle fermée.*

$$\frac{S}{R} = \frac{\frac{1}{R}}{\frac{1}{Q} + \sum_{j=1}^{J} \frac{1}{Q_j}} \left(\sum_{j=1}^{J} \frac{W_j}{Q_j} \right) \underbrace{\Longrightarrow}_{Q_j = Q} S = \frac{1}{J+1} \sum_{j=1}^{J} W_j$$

Nous vérifions que ce circuit permet bien de sommer les signaux en intensité issus des diodes. Cependant, contrairement aux consignes d'utilisation du quadrant de photodétecteur qui utilise l'astigmatisme de la lentille de focalisation pour générer des motifs sur les photodétecteurs caractéristiques de la distance du point focal à la surface de l'échantillon, nous nous contentons de sommer les signaux issus des diodes. Il faudrait en effet théoriquement sommer les signaux des diodes diagonalement opposées, et effectuer la différence des deux signaux résultant, mais il est apparu empiriquement qu'une somme de tous les signaux donnait de meilleurs résultats. Ainsi, le circuit présenté ici (figure 4, gauche) convertit les potentiels W_j issus des photodiodes (eux même fonction des courants circulant dans les diodes, fonction de l'intensité lumineuse captée) en courants *via* les résistances Q_j. Ces courants sont sommés au point V_+ et la résistance Q agit comme un convertisseur courant-tension. Enfin l'ampli-amp convertit la haute impédance d'entrée V_+ en une sortie basse imédance S *via* le montage suiveur utilisant la résistance R (qui peut éventuellement être nulle). Bien que nous ayons illustré l'équation ci-dessus en prenant $Q_j = Q$ pour la rendre plus lisible, nous choisissons en pratique $Q \gg Q_j$ pour que la

somme des courants soit convertie en une tensions suffisamment élevée pour être utilisable ($Q = 1$ MΩ et $Q_j = 560$ Ω dans notre montage).

Il est alors possible de générer un signal électrique fonction de la distance lentille-échantillon (figure 4, droite).

1.3 Estimation de la plage de fonctionnement du capteur

Une première analyse rapide utilisant le moteur DC contrôlant la position de la tête de lecture montre que l'intervalle de mesure en boucle ouverte (en ne mesurant que le signal issu des photodiodes sans contrôler la distance lentille-échantillon) est relativement restreint, de quelques centaines de micromètres au maximum. La courbe présentée en figure 5 permet de s'assurer du bon fonctionnement de l'ensemble du dispositif laser-photodétecteur quatre-quadrants.

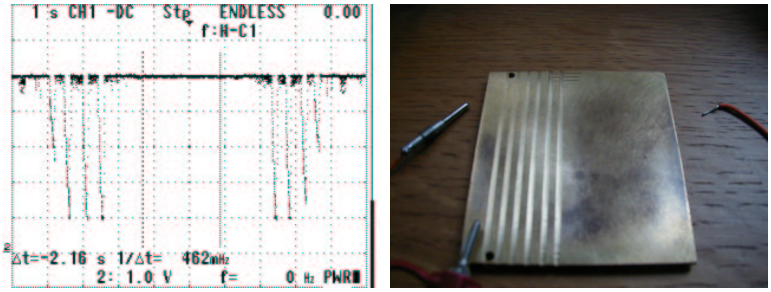

FIG. 5 – *Mesure du signal issu de la somme des quatre-quadrants du photodétecteur de la tête de lecture lorsque un échantillon de laiton possédant des rainures de profondeur croissante (de 100 µm à 500 µm) circule sous la lentille. Cette mesure permet d'estimer la dynamique du capteur.*

2 La table traçante (*plotter*)

Une fois le capteur de distance installé et calibré, un second problème est de déplacer l'échantillon relativement à la sonde. Cette partie peut être rendue totalement indépendante de la précédente en maintenant la sonde fixe et en translatant l'échantillon. Cette option est celle utilisée dans de nombreuses versions de l'AFM car elle facilite le découplage du positionnement horizontal de l'échantillon et la position verticale de la sonde.

Nous avons pour notre part utilisé un plotter de récupération Roland DXY-1200 qui offre une résolution latérale de 25 µm et se commande numériquement via une connection série (RS232) à 9600 bauds (N81). Le langage de commande, HPGL, est très bien documenté et simple d'emploi [8]. Cette solution est plus simple à mettre en œuvre que l'utilisation d'une table traçante analogique qui nécessite deux convertisseurs numériques-analogique supplémentaires et ne garantit pas une résolution latérale constante.

Les seules commandes HPGL utiles dans cette application sont `PU;` pour relever le porte-stylo (et ainsi amener l'échantillon à une hauteur prédéfinie), `PAx,y;` pour amener l'échantillon à une position (x,y) prédéfinie où a été préalablement placée la tête de lecture de CD, et finalement `PRx,y;` pour déplacer l'échantillon d'une distance (x,y) relativement à sa position courante. Cette dernière commande est utilisée avec les couples ($\pm$1,0) lors du balayage d'une ligne avec une résolution de 25 μm/pixel et (0,1) pour passer à la ligne suivante. Toutes les valeurs de x et y sont en unités de 25 μm/pixel.

3 Le logiciel

Nous distinguons deux modes de fonctionnement d'un AFM que nous nommerons en boucle ouverte ou en boucle fermée. Dans le premier cas, la sonde est positionnée en début de balayage à une distance de la surface où la relation signal-distance présente une pente maximum dans la région de bijectivité, puis l'échantillon se déplace et le signal issu de la sonde est enregistré pour chaque nouvelle position. Dans le second cas, la position verticale de la sonde est ajustée pour chaque nouveau point de l'échantillon de façon à obtenir un signal issu de la sonde égal à une valeur de consigne, et la commande de l'altitude de la sonde est le signal enregistré. Le second mode de travail, bien que plus complexe en terme d'implémentations et donc plus lent, comporte plusieurs avantages tels que :

- la linéarité du signal lu n'est plus dépendante de la propriété physique mesurée (qui n'est généralement pas sous le contrôle de l'expérimentateur) mais de l'actuateur contrôlant l'altitude de la sonde
- la plage de fonctionnement du profilomètre est considérablement étendue car n'est plus limité par la zone de bijectivité de la relation signal-distance, elle même dépendante du signal physique issu de la sonde. Ainsi, plutôt que de nécessiter que la distance sonde-échantillon reste dans la plage de bijectivité sur *l'ensemble* de la surface analysée, il suffit que la distance entre *deux points successifs* vérifie cette condition.

Dans cet exemple, nous constatons en déplaçant un miroir face-avant devant la lentille focalisant le laser que le signal lu sur le photodétecteur ne varie avec la distance que sur une fraction de millimètre, ce qui nécessite un réglage relativement fin du parallélisme entre le plan de la surface à balayer et le plan dans lequel l'échantillon est translaté. En boucle fermée, la plage d'actuation de la lentille au moyen de l'électroaimant est de plusieurs millimètres, et la plage d'application du profilomètre en est considérablement étendue.

Le passage d'un capteur informant avec une bonne résolution de la distance à la surface de l'échantillon à un microscope à balayage fonctionnel nécessite un peu d'électronique numérique et de programmation. Le signal issu du photodétecteur multi-quadrants est converti en un signal numérique au moyen d'un convertisseur analogique-numérique (*analog to digital converter*, ADC : résolution 12 bits au moyen d'un AD574 installé sur une carte ISA dans notre cas). La commande de déplacement de l'électroaimant se fait au moyen d'un convertisseur numérique-analogique (*digital to analog converter*, DAC : résolution 16 bits au moyen d'un AD669 installé sur une carte ISA dans notre cas). Le logiciel, écrit en Turbo Pascal sous DOS, commande à la fois la lecture des données topographiques et

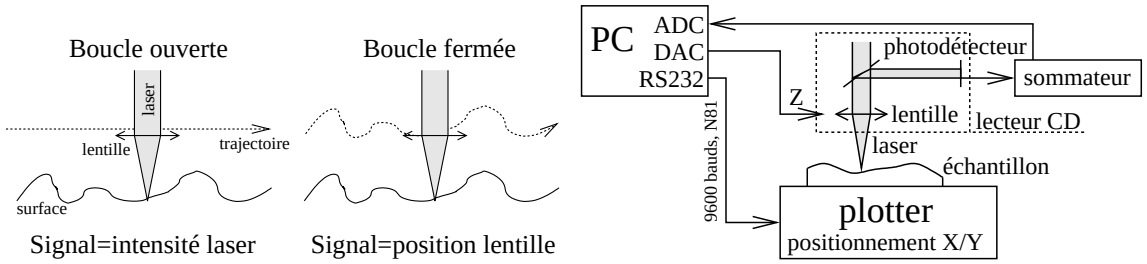

FIG. 6 – *Gauche : les deux modes de fonctionnement d'un microscope à sonde locale (en boucle ouverte à gauche, où seule la valeur du détecteur est sauvée ; en boucle fermée à droite où la valeur du détecteur est maintenue à une valeur de consigne en variant la distance capteur-surface). Droite : montage expérimental.*

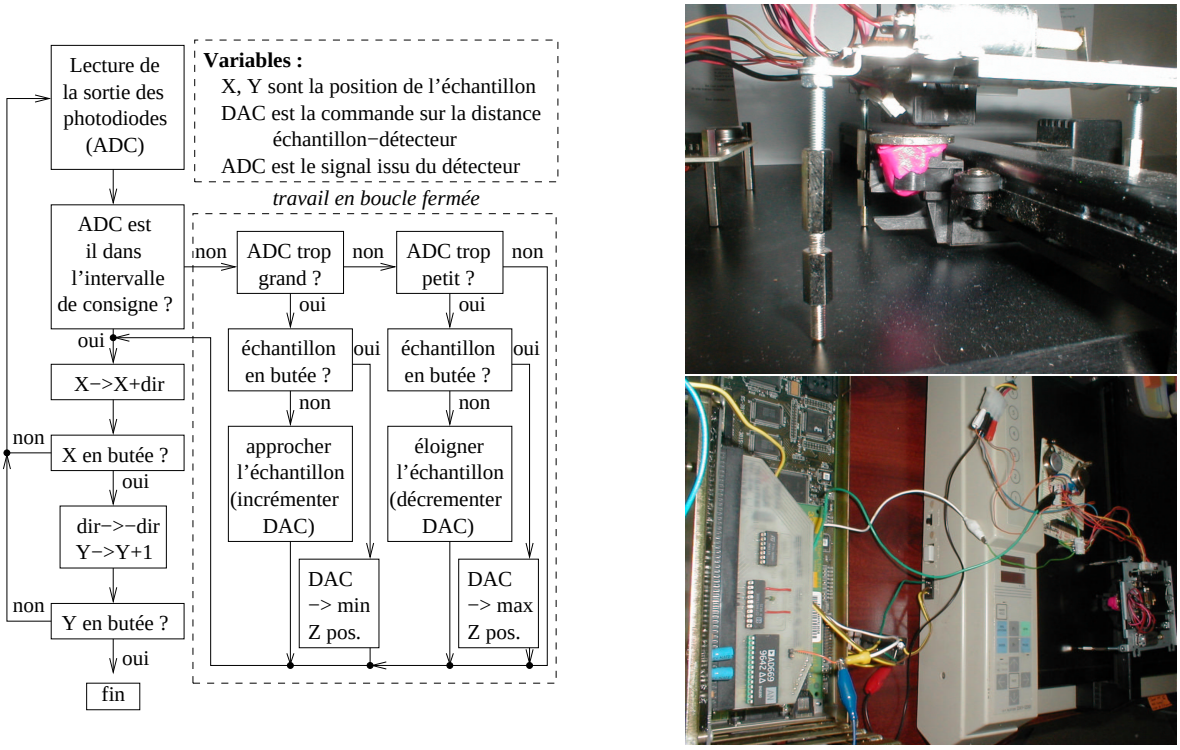

FIG. 7 – *Algorithme de contrôle de l'instrument. En utilisation en boucle ouverte, la valeur issue du capteur (ADC : somme des courants issus des photodiodes) est sauvée, tandis qu'en boucle fermée nous sauvons le courant circulant dans la bobine de l'électroaimant (DAC) lorsque ADC est à la valeur de consigne. Droite : photographies du montage expérimental. Haut: noter l'utilisation d'entretoises pour régler la hauteur du capteur et son parallélisme avec le plan moyen de l'échantillon. Bas: le PC contrôlant l'expérience est visible au premier plan avec la carte de conversion numérique-analogique, tandis que la table traçante et l'électronique liée à la diode laser sont à l'arrière plan.*

la synchronisation du déclenchement des acquisitions avec le déplacement de l'échantillon comme présenté sur la figure 7.

Une alternative au développement des cartes d'acquisition et de contrôle sur bus ISA de PC est l'utilisation d'un microcontrôleur : une large gamme est désormais disponible ne nécessitant que très peu de composants périphériques pour fonctionner, souvent équipés de convertisseurs analogiques-numériques tandis que le convertisseur numérique-analogique peut être réalisé à moindre coûts avec un réseau de résistances. Les microcontrôleurs Motorola 68HC11F1 ou Hitachi H8/3048F ne nécessite pas de programmeur spécialisé (se programment directement par le port série RS232 d'un PC) et sont équipés des convertisseurs nécessaires à la réalisation de cette expérience ainsi que du port série pour commander la table traçante. Le développement de montages de tests pour ces circuits dépasse le cadre de cette présentation : le lecteur intéressé est renvoyé aux documents disponibles sur `http://mmyotte.free.fr` pour plus d'informations.

3.1 Mesures en boucle ouverte

Pour une mesure en boucle ouverte, la surface à analyser est tout d'abord placée sous la lentille de la tête de lecteur CD. La hauteur de celle-ci est alors ajustée tandis que le convertisseur analogique-numérique affiche les valeurs lues en sortie du photodétecteur : lorsqu'une variation de ces valeurs apparaît alors que la hauteur de la tête varie, nous avons atteint un point de fonctionnement utilisable. Il vaut mieux choisir un point où la pente de la relation signal-distance est maximale, au milieu de la plage de bijectivité de cette relation. La position de la lentille est alors fixée, de même que la hauteur de l'échantillon, et l'analyse de l'échantillon consiste simplement à déplacer latéralement la surface et lire la valeur issue du photodétecteur pour chaque nouvelle position.

Une fois le balayage achevé, nous obtenons un fichier comportant une matrice de $N \times N$ valeurs qui sont affichées sous forme d'image au moyen de Matlab (fonction `imagesc`).

Ce mode d'imagerie est rapide mais limité par la plage de sensibilité du capteur : si la surface à analyser dépasse cette plage (surface trop proche ou trop loin de la lentille), l'image résultante est saturée et ne contient pas d'information utile sur la surface. Dans le cas de l'AFM, le problème est plus grave car si la surface s'approche trop de la pointe qui sert de sonde, celle-ci peut être endommagée voire détruite par une force trop importante. De plus, la force appliquée par la pointe sur l'échantillon n'est pas contrôlée et n'est pas constante, d'où des problèmes de non-linéarité de la relation force-distance (forces attractives ou répulsives selon la distance) et il existe un risque d'endommager une surface trop molle par l'application d'une force trop importante (notamment pour les échantillons d'origine biologique).

3.2 Mesures en boucle fermée

Dans ce mode, au lieu de garder la hauteur de la lentille contrôlant la position du point de focalisation du laser constante, nous connectons le bobine (électroaimant) à laquelle est fixée la lentille à un convertisseur numérique-analogique (*via* un transistor de

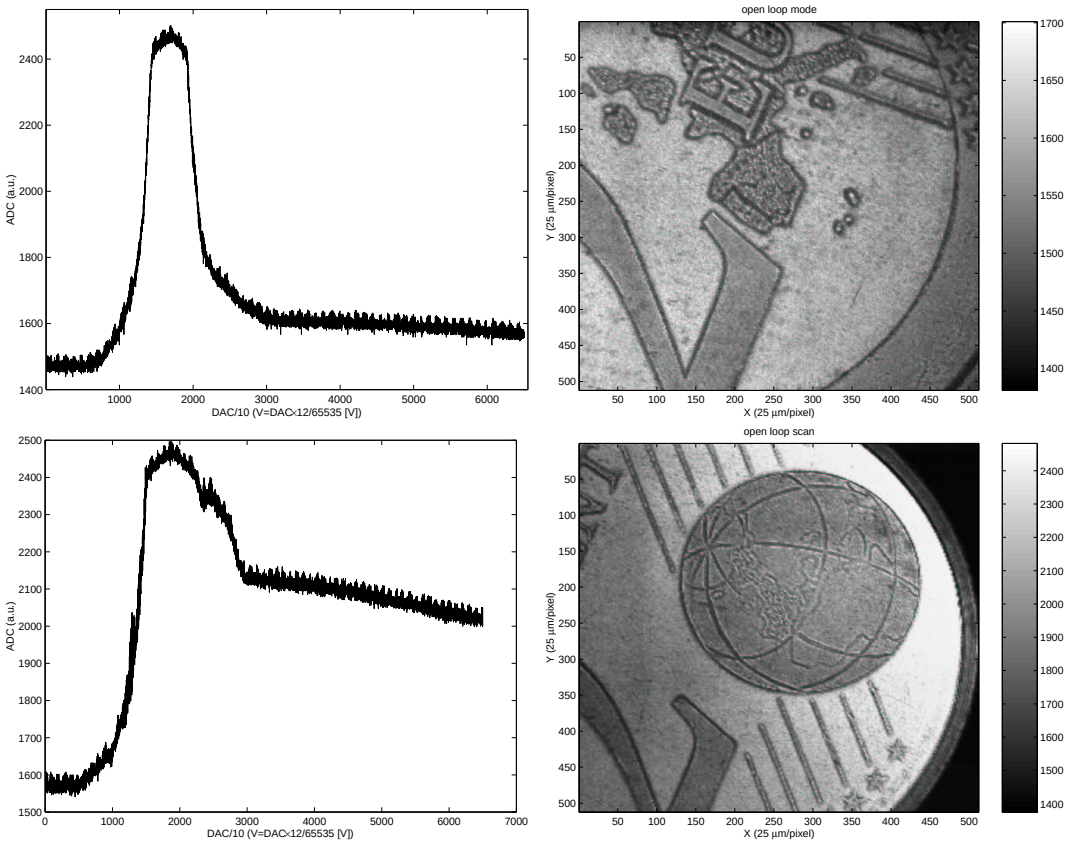

FIG. 8 – *Relation signal-distance (gauche) et topographie (droite) de pièces de 2 euros (haut) et 2 centimes d'euros (bas) acquises en boucle ouverte.*

puissance 2N3055 en amplificateur de courant) pour pouvoir suivre le profil de la surface en maintenant le signal issu des photodétecteurs constant.

Ce mode est un peu plus lent que le précédent car il nécessite un ajustement de la hauteur de la bobine pour chaque nouveau point de la surface analysée, mais l'image résultante n'est plus dépendante de la relation signal-distance (issue du photodétecteur ou de la déflection de la pointe dans le cas d'un AFM) mais uniquement de la relation actuateur-distance, qui est beaucoup plus simple à contrôler. De plus, la plage de fonctionnement est uniquement limitée par le mode de déplacement de la lentille, qui offre une amplitude de plusieurs millimètres dans le cas de l'électroaimant utilisé dans une tête de lecteur CD.

Dans le cas particulier qui nous intéresse ici, il semble évident que les images en boucle ouverte sont de meilleure qualité que les images en boucle fermée. Nous attribuons ce résultat au fait que l'actuateur (l'électroaimant contrôlant la position de la lentille) n'est pas adapté à notre application et n'améliore ni la dynamique du signal (plage de fonctionnement), ni la linéarité de la relation distance-signal. De plus, la faible bande passante de la tête de lecture implique qu'il faut attendre plus longtemps que nous ne le faisons pour

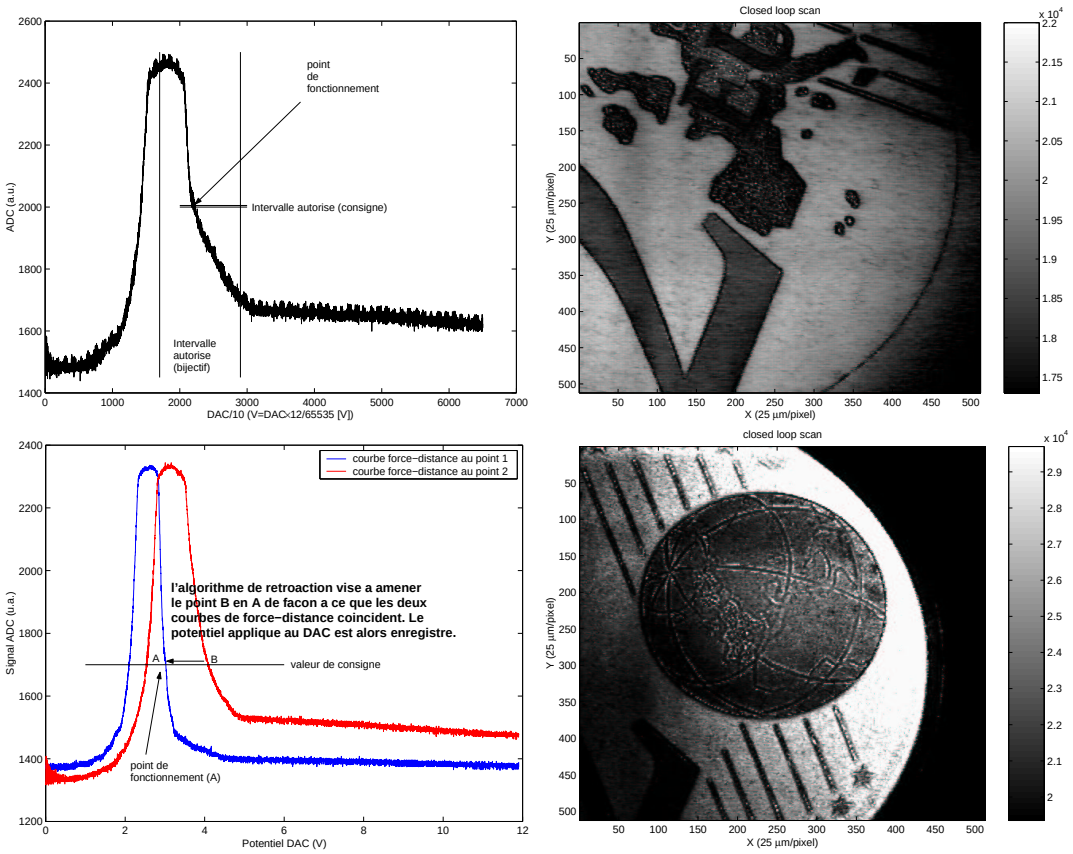

FIG. 9 – *Relation signal-distance (gauche) et topographie (droite) de pièces de 2 euros (haut) et 2 centimes d'euros (bas) acquises en boucle fermée.*

que la position de la lentille se stabilise au-dessus de l'échantillon au cours de la rétroaction (la version du programme d'acquisition de données utilisé ici ne contient pas de délai entre l'actuation de l'électroaimant et la lecture de la valeur issue des photodétecteurs, l'acquisition d'une image étant déjà très lente). Nous gagnons tout de même en résolution lors du passage de l'algorithme en boucle ouverte à l'algorithme en boucle fermée puisque la valeur sauvegardée pour le tracé de la topographie passe d'une valeur de l'ADC sur 12 bits à une valeur du DAC sur 16 bits.

Nous n'abordons pas ici les techniques de traitement d'images souvent utilisées après acquisitions des données topographiques. Contentons de mettre en garde contre les risques de faire apparaître des artéfacts lors de l'utilisation des méthodes les plus sophistiquées. Toutes les images présentées dans ce document sont issues des données brutes et n'ont subi aucun traitement.

4 Conclusion et perspectives

Nous avons utilisé efficacement une tête de lecteur CD pour la réalisation d'un profilomètre optique. Nous avons ainsi pu effectuer en pratique les différentes étapes nécessaires à la réalisation de tout microscope à sonde locale. Nous avons pu voir les différentes étapes de réalisation de la sonde ainsi que du système de positionnement de l'échantillon par rapport à la sonde, puis les différents modes d'utilisation de ce type d'instruments.

De même que le premier AFM était une extension du microscope électronique à effet tunnel, il serait ici éventuellement possible d'améliorer la résolution latérale en ajoutant une sonde intermédiaire entre la surface et le spot laser. Ainsi, le spot laser serait utilisé pour détecter la déflection d'un levier du type de ceux utilisés dans un AFM, qui serait directement sensible aux forces appliquées par la surface sur la pointe. Ce type de sonde intermédiaire additionnelle ouvre de vastes perspectives d'extensions de l'instruments par le choix d'une sonde adéquate pour détecter une propriété autre que la topographie de l'échantillon.

Références

[1] J.-P. Vigneron & C. Goffaux, *Les nouvelles microscopies*, Bulletin de l'Union des Physiciens 839 (12/2001) pp.1811-1825

[2] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber & W. Weibel, *Surface Studies by Scanning Tunnelling Microscopy*, Phys. Rev. Lett. **49** 1 (5 Juillet 1982) pp.57-61

[3] G. Binnig, C.F. Quate & Ch. Gerber, *Atomic Force Microscope*, Phys. Rev. Lett. **56** 9 (3 Mars 1986) pp.930-933

[4] Y. Martin & H.K. Wickramasinghe, *Magnetic Imaging by "force microscopy" with 1000 Å resolution*, Appl. Phys. Lett. **50** 20 (18 Mai 1987) pp.1455-1457

[5] A.J. Bard, F.R.F. Fan, J. Kwak & O. Lev, *Scanning Electrochemical Microscope. Introduction and Principles*, Anal. Chem., **61** (1989) pp.132-138

[6] F. Perraut Francois, A. Lagrange, P. Pouteau, O. Peyssonneaux, P. Puget, G. McGall, L. Menou, R. Gonzalez, P. Labeye, F. Ginot, "A new generation of scanners for DNA chips", Biosensors and Bioelectronics **17** (9) 803-813 (2002)
`http://www-leti.cea.fr/Commun/Revue_Annuelle/biology&health/FGINOT.PDF`

[7] `http://cord.org/cm/leot/course04_mod06/mod04_06.htm`

[8] `http://astronomy.swin.edu.au/~ pbourke/geomformats/hpgl/`