# Utilisation d'une tête de lecture de CD dans la réalisation d'un profilomètre

J.-M. Friedt, d'après une idée originale de Christian Ferrandez, avec l'assistance de Raphaël Patois

## 1 Introduction

Un lecteur de CD est basé sur une tête de lecture comportant pour la partie optique une diode émetrice laser en IR proche (longueur d'onde de de l'ordre de 780 nm), un quadrant de photodiodes réceptrices ainsi que l'optique de focalisation, et pour la partie mécanique une bobine formant un électroaimant permettant de varier la distance entre le disque et l'ensemble des éléments optiques (figure 1). Pour son bon fonctionnement, une tête de lecteur laser doit pouvoir être positionnée rapidement et avec une grande précision par rapport à la surface réfléchissante du CD. L'objectif est de positionner le point focale de la lentille convergente, d'un diamètre de l'ordre de 1,7 $\mu$m, sur la surface de CD, et ce en annulant les signaux reçus par 4 des 6 quandrants de la photodiode de réception (effet de l'astigmatisme : selon que le point focal soit plus près ou plus loin de la surface réfléchissante du CD, deux quandrants opposés diagonalement sont illuminés – l'objectif étant d'annuler le signal issu des 4 quadrants simultanèment pour positionner correctement le point focal).

Nous utiliserons ici ce dispositif optique et son support mécanique pour réaliser un profilomètre basé sur le dispositif de focalisation décrit ci-dessus. Nous décrirons tout d'abord comment alimenter la diode laser pour obtenir une puissance émise constante, nous aborderons les problèmes de stabilité de la mesure de distance, puis nous complèterons le circuit par une boucle de rétroaction permettant de travailler à point de focalisation constant permettant d'ainsi diminuer la taille du spot sur la surface de l'échantillon scanné et d'augmenter la dynamique de mesure à quelques millimètres.

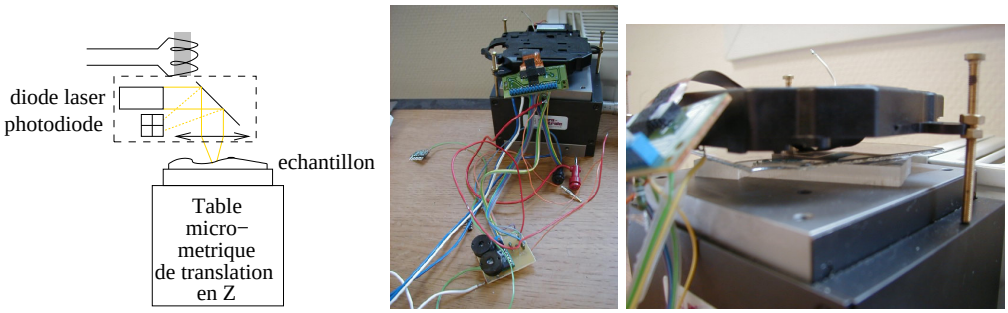


Figure 1: Dispositif expérimental : la tête optique d'un lecteur de CD est placée au-dessus d'un échantillon réfléchissant dont la hauteur peut varier de façon à s'approcher du point focal de la lentille. Cette lentille peut elle-même être déplacée selon l'axe vertical par un électroaimant. Une photodiode quatre-quadrants informe sur la distance entre le point focal de la lentille et l'objet réfléchissant.

## 2 Fonctionnement de la diode laser émettrice

La diode laser comporte une cavité d'émission d'un faisceau laser infra-rouge et un photorécetpeur informant de la puissance émise. La conductivité de l'émetteur laser décroissant avec la température, il n'est pas possible de l'alimenter par un générateur de tension (sous peine de rapidement voir l'intensité croître jusqu'à destruction du composant). Il faut donc alimenter la diode au moyen d'un générateur de courant constant ou, mieux, monté dans une boucle de rétroaction permettant une alimentation à puissance laser émise constante (en lisant sur le photorécepteur interne au composant la puissance émise). Nous proposons dans ce but le montage de la figure 2, où la tension de consigne est fixée au moyen d'un potentiomètre à la valeur de 90 mV (tension lue au voltmètre sur cette broche lors du fonctionnement de la diode connectée à son électronique de contrôle originale). Cette tension de rétroaction correspond à un courant d'alimentation de l'ordre de 60 mA.

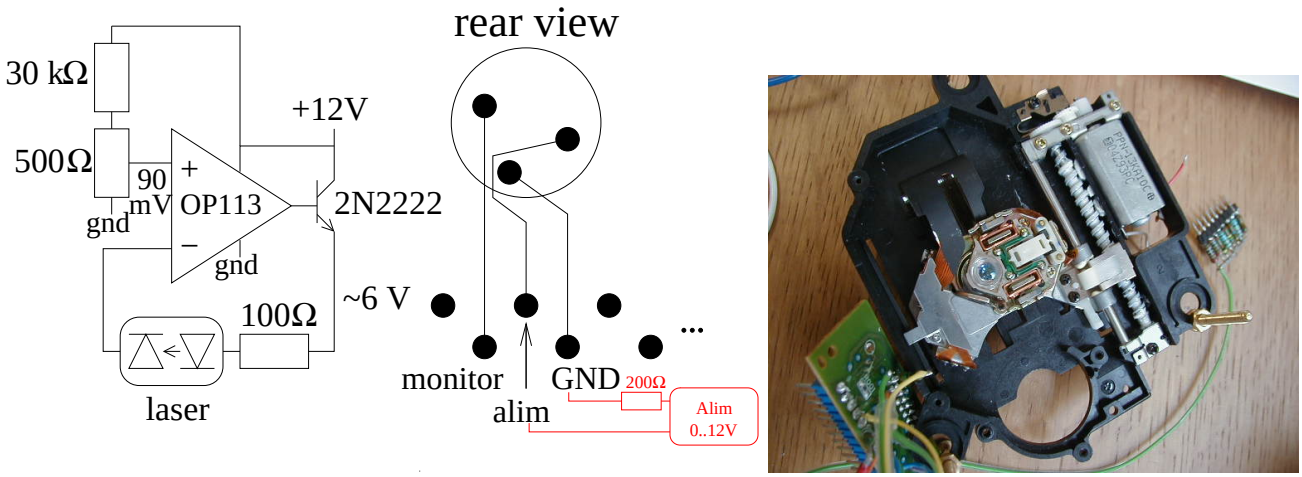


Figure 2: À gauche : circuit d'alimentation de la diode laser régulé en puissance. À droite : fonction des 3 broches présentes à l'arrière de la diode laser, et points de connexion d'un générateur de tension pour tester l'état de marche de la diode.

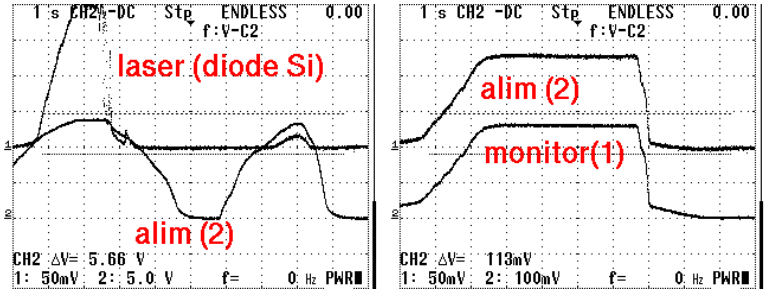


Figure 3: À gauche : puissance lue sur une diode Si placée devant la lentille de focalisation, et tension d'alimentation de la diode. À droite : tension en sortie du photodétecteur (broche monitor) et tension d'alimentation de la diode.

Il semble que les fonctions des broches de toutes les diodes laser soient identiques. La diode se met brusquement à laser pour un courant d'alimentation de l'ordre de 60 mA (figure 3). Il est donc nécessaire d'introduire un transistor dans la boucle en suiveur de tension, l'ampli op ne pouvant déliver une telle intensité (le transistor 2N2222 utilisé ici est légèrement sous-dimensionné et doit être refroidi par un radiateur). L'émission laser se vérifie dans un premier temps au moyen d'une photodiode Si. Une fois l'émission laser en sortie de la lentille de focalisation observée, noter la tension sur en sortie du photorécepteur interne et régler le potentiomètre fixant la consigne à cette valeur. La boucle de rétroaction se charge alors d'adapter la tension en sortie de l'AO de façon a obtenir un courant d'alimentation de la diode laser permettant une puissance luminseuse émise constante.

## 3 Cablage et utilisation des diodes réceptrices

L'utilisation d'un récepteur multi-cadrants lors de la lecture d'un disque se fait de la façon suivante :
- un récepteur 4-quadrants permet d'observer la focalisation du laser sur la surface réfléchissante
- deux récepteurs de part et d'autre du récepteur 4-quadrants sont utilisés pour maintenir la tête de lecture sous la piste.

Les photorécepteurs sont polarisés par une tension de +5 V pour en augmenter la bande passante jusqu'à une fréquence supérieure au MHz (rappelons que 74 min de musique CD tiennent sur 650 MB, soit 1.2 Mb/s).

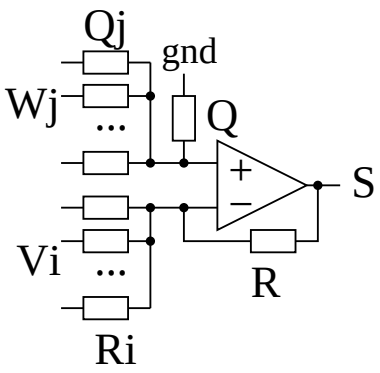


Figure 4: Circuit utilisé en sortie des diodes pour effectuer les sommations et soustractions nécessaires pour obtenir un signal utilisable. La sortie $S$ est alors connectée à l'entrée d'un convertisseur analogique-numérique et donne la distance de la lentille de focalisation du laser à l'échantillon.

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

Nous avons donc bien avec ce circuit la possibilité de sommer deux diodes, et de soustraire le résultat à la somme des deux autres diodes (figure 4). Nous pouvons ainsi produire un signal proportionnel à la distance séparant la lentille convergente du laser de la surface réfléchissante (figure 5).

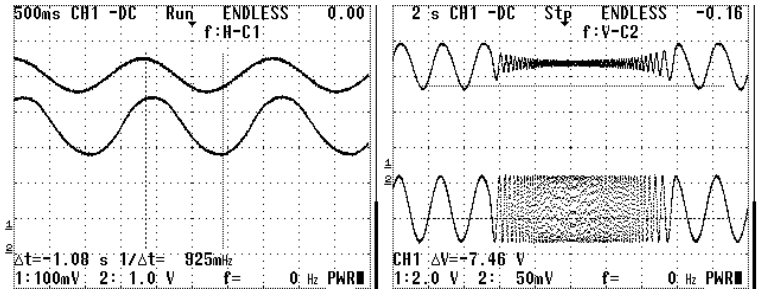


Figure 5: Signal d'excitation de la tête optique (en haut) et signal issu de la combinaison adéquate des signaux provenant des diodes de réception. À droite : évolution de l'amplitude du signal observé à amplitude d'excitation de la tête constante et fréquence variable).

## 4 Problème de stabilité

La diode laser chauffe après allumage. La dilatation des éléments de la tête de lecture du CD implique une variation sensible de la distance tête-échantillon dans les premières dizaines de minutes après allumage (figure 6. Il est donc nécessaire d'attendre un temps suffisant (de l'ordre de l'heure) pour que la température de la tête de lecture se stabilise et que la lecture de distance tête-échantillon cesse de dériver.

## 5 Boucle de rétroaction pour le scan à distance constante

Après un premier essai de scan à hauteur de tête constante qui nous a permis de constater que la plage de mesure est très réduite (quelques centaines de microns tout au plus, 7), nous nous sommes efforcé de développer une rétroaction

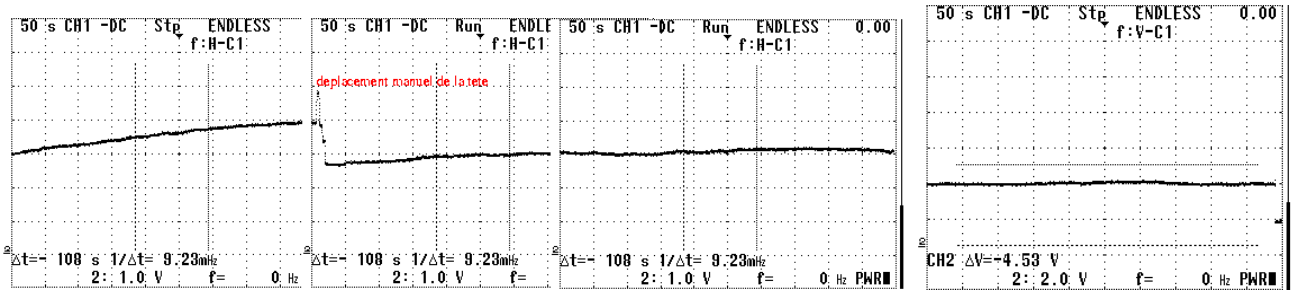


Figure 6: À gauche : évolution de la distance lentille-échantillon mesurée dans les premières minutes après l'allumage de la diode laser (l'échantillon étant maintenu à distance fixe durant ce lapse de temps). Cette dérive est attribué à la dilatation thermique liée à l'échauffement de la diode laser. À droite : illusatration de la stabilité de la mesure une fois la température de la diode fixée après quelques heures de fonctionnement.

permettant à la tête de lecture de suivre le profil de l'échantillon (pour ainsi obtenir un battement de quelques millimètres).

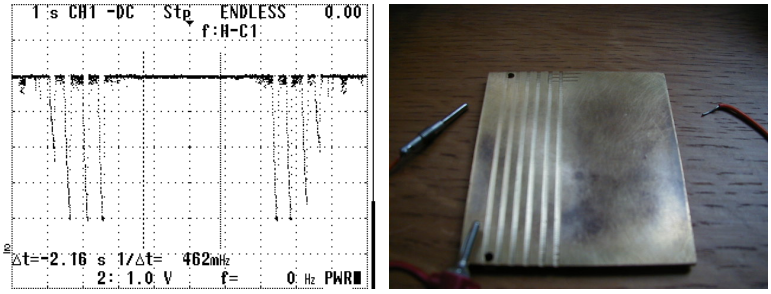


Figure 7: Travail à hauteur constante : 5 gravures de profondeur croissante entre 100 $\mu$m et 500 $\mu$m ainsi qu'une ligne de profondeur inconnue (inférieure à 100 $\mu$m) ont été fraisées dans une pièce plane de laiton.

L'objectif est de maintenir la distance entre la lentille de focalisation du laser et la surface réfléchissante de l'échantillon au cours du scan. La dynamique de mesure est ainsi plus importante et nous nous afranchissons des non-linéarités dans la relation signal-distance ("signal" étant le signal issu de la combinaison des tension issues de la diode quatre-quadrants).

Nous utilisons, dans un souci de portabilité et de simplicité de montage, un microcontroleur 68HC11 pour les acquisitions (8 bits) et le contrôle de la position de la tête optique. Cette dernière opération s'effectue en variant le courant circulant dans la bobine formant un élecroaimant : la sortie numérique d'un des ports 8 bits du 68HC11 est transformé en un convertisseur numérique-analogique par un réseau de résistances de valeurs $X.2^i$ (nous avons choisi $X = 1000\ \Omega$, $i = 0..7$. Voir figure 8). La boucle de rétroaction se limite alors simplement en une comparaison entre la distance lentille-échantillon courante, une comparaison avec la valeur de consigne (fixée initialement), et une rétroaction sur le convertisseur numérique-analogique pour approcher ou éloigner la tête de lecture de l'échantillon. La commande de déplacement de la tête est renvoyée via le port série (RS232) à un PC et sert pour cartographier la surface (figure 9).

$$S\left(1+R\sum_{i=1}^{I}\frac{1}{R_i}\right)=R\sum_{i=1}^{I}\frac{V_i}{R_i}\underbrace{\Longrightarrow}_{R_i=\frac{X}{2^i},\ I=7}S\left(1+\frac{R}{X}.255\right)=R\sum_{i=1}^{I}V_i\frac{2^i}{X}\Rightarrow S_{max}=\left(1-\frac{X}{X+255R}\right)V_{TTL}$$

Dans notre cas, $X = 1000\ \Omega$ donc si on veut $S_{max} = \frac{9}{10}V_{TTL}$, on choisit $R = \frac{9X}{255} = 35\ \Omega$. Nous avons utilisé en pratique $R = \infty$.

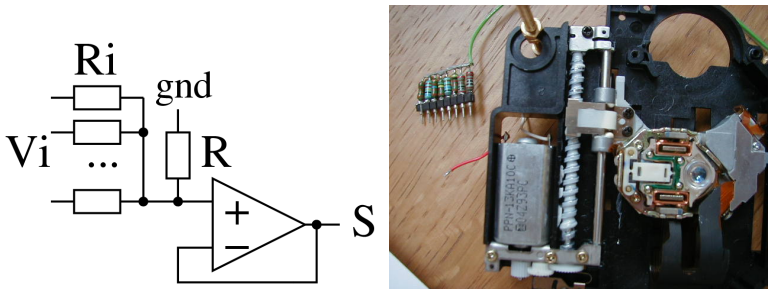


Figure 8: Circuit utilisé en sortie du 68HC11 permettant de transformer une sortie TTL sur 8 bits en convertisseur numérique-analogique sur 255 valeurs. La sortie alimente, via un transistor, le bobinage de l'électroaimant permettant de varier la distance de la tête de lecture CD à l'échantillon.

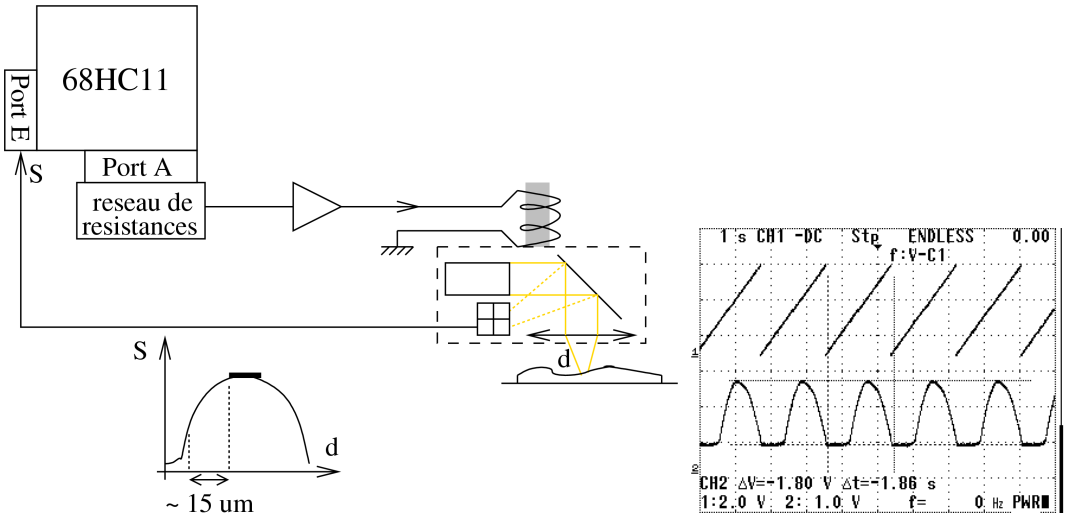


Figure 9: Principe de la boucle de rétroaction : le microcontroleur lit la tension issue de la combinaison des signaux des diodes, et compare cette valeur à une valeur de consigne prédéfinie. Une action adéquate sur l'électroaimant (incrément ou décrément du courant dans la bobine) est effectuée pour approcher la valeur lue de la valeur de consigne. Pour une distance de l'échantillon au point focal trop grande, la pente de la relation signal des diodes-distance change de signe (cf image de droite), et la rétroaction n'est plus efficace.

Table 1: Programme pour 68HC11 de rétroaction (suppose l'entrée analogique 4 pour lire le signal, et le DAC connecté au port A).

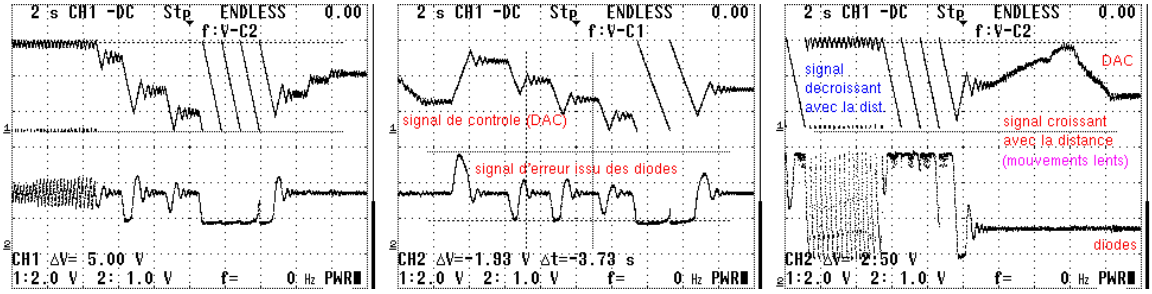


Figure 10: À gauche et au centre : deux exemples de rétroaction sur la position de la tête pour maintenir le signaux des diodes à la valeur de consigne (tandique que la table portant l'échantillon est manipulée manuellement). À droite : illustration de l'incapacité de la boucle de rétroaction à fonctionner dans la zone où la dérivée de la relation signal (des diodes)-distance change de signe (partie gauche de l'image – opposée à la partie droite de l'image où l'échantillon a été replacé de façon à retrouver le bon signe de la dérivée.

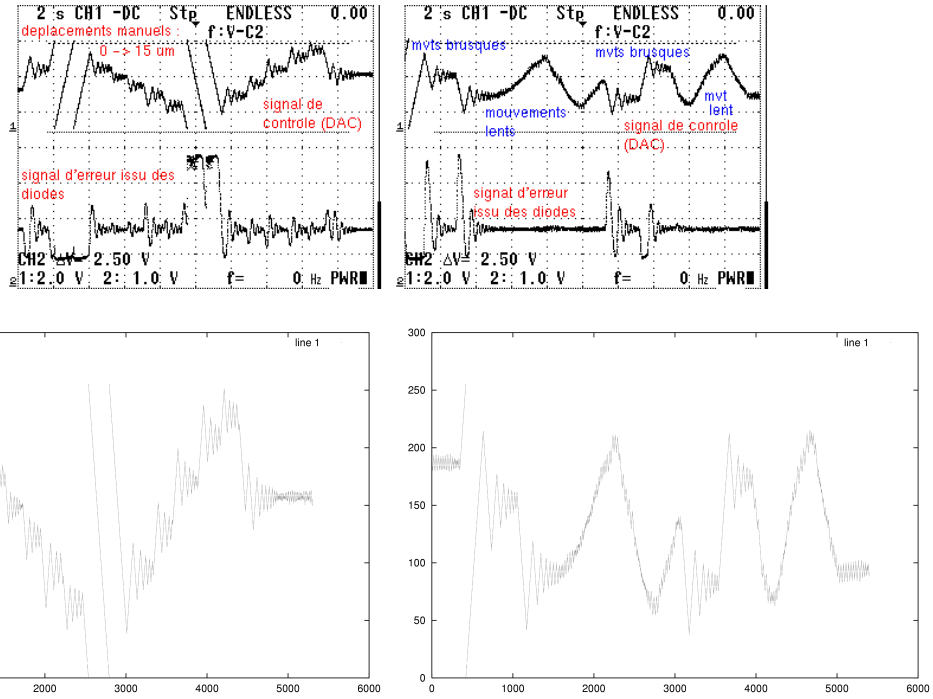


Figure 11: En haut : signal d'erreur (écart de la tension issue des diodes par rapport à la consigne) et signal de contrôle (issu du DAC). À la verticale de chaque image, en bas : signal transmis par le 68HC11 sur le port série sur le PC fournissant le signal de contrôle utilisé comme information pour tracer la topographie de l'échantillon.