

Mesure d'une vitesse instantanée par effet Doppler

par Fouad LAHMIDANI et Nicolas SCHLOSSER

Lycée Louis-le-Grand - 75005 Paris

fouad.lahmidani@louislegrand.eu

nicolas.schlosser@louislegrand.eu

CET ARTICLE décrit une expérience utilisant l'effet Doppler pour mesurer la vitesse instantanée d'un chariot accéléré, roulant sur un plan. L'idée générale est de mesurer le décalage Doppler de la fréquence de l'onde ultrasonore issue d'un émetteur lié au chariot mobile en réalisant des battements avec l'onde issue d'un émetteur fixe. Deux autres méthodes de mesure de la vitesse permettent de vérifier les résultats obtenus. Après une description détaillée du protocole et des difficultés expérimentales rencontrées, nous présentons les résultats obtenus avant de conclure sur la validité de cette méthode de mesure d'une vitesse instantanée.

1. DESCRIPTION DE L'EXPÉRIENCE

1.1. Matériel utilisé

Chariot lesté avec une masse de 500 g sur un plan incliné Pasco ♦ le capteur angulaire de position (poulie) ♦ l'interface Pasco ♦ le logiciel dédié *DataStudio* ♦ un générateur basse fréquence (GBF) ♦ deux émetteurs simples ♦ un récepteur Moduson ♦ le détecteur de passage à photodiode ♦ une carte d'acquisition Sysam ♦ le logiciel *LATIS-Pro*.

1.2. Principe général de l'expérience

On désire mesurer la vitesse instantanée d'un

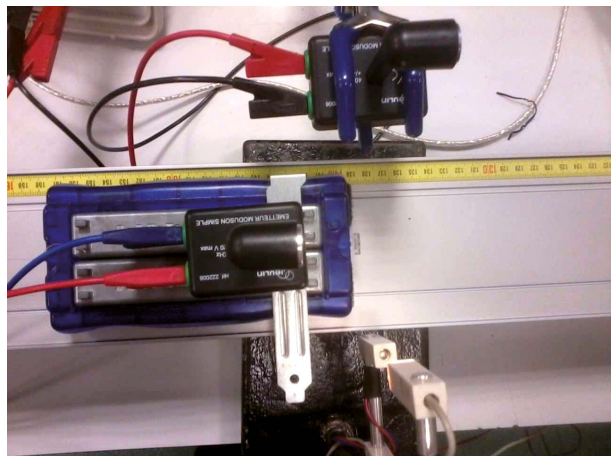


Figure 1 - Détail des émetteurs et du détecteur de passage à photodiode.

mobile en faisant battre deux sources ultrasonores. L'une est fixe, de fréquence $\nu_0 \sim 40$ kHz. L'autre, solidaire du mobile en mouvement de vitesse V , a une fréquence décalée par effet Doppler de $\Delta\nu = \frac{V}{C} \nu_0$ où C est la vitesse du son. La fréquence de l'enveloppe des battements permet donc de mesurer la vitesse V du mobile, mesure que l'on compare avec deux autres valeurs obtenues différemment : l'une au moyen d'un capteur de position, l'autre par un détecteur de passage à photodiode.

1.3. Protocole expérimental

On fait rouler un chariot lesté d'environ 800 g sur un plan faiblement incliné (sa vitesse n'est pas constante, mais le temps nécessaire à l'acquisition des battements est suffisamment court pour permettre la mesure d'une vitesse instantanée).

On relie le chariot à une masse de 50 g environ par un fil passant sur une poulie. Cette dernière est un capteur de position angulaire Pasco. Connaissant son rayon, elle devient le capteur de la position⁽¹⁾ du chariot. L'acquisition de la position temporelle du chariot est effectuée au moyen de la centrale de capteurs Pasco, pilotée par le logiciel *DataStudio*.



Figure 2 - Vue d'ensemble du dispositif.

Un émetteur à ultrason Moduson est fixé à côté du plan incliné alors que le second est collé sur le chariot. Les deux émetteurs sont alimentés par une tension sinusoïdale de fréquence $\nu_0 = 39,9$ kHz et d'amplitude de l'ordre de 8 V (soit 16 Vpp). Au bout

(1) On ne peut pas utiliser les capteurs de position utilisant les ultrasons, car ils sont perturbés par les ondes ultrasonores utilisées pour les battements.

du plan incliné, à une distance d'environ 50 cm du capteur fixe, on place le récepteur à ultrason. Lorsque les deux émetteurs sont côte à côte, le récepteur est centré de façon à équilibrer les distances avec les deux émetteurs⁽²⁾. On fait l'acquisition du signal issu du récepteur à ultrason sur la voie EA₀ de la carte d'acquisition (pilotée par *LATIS-Pro*).

Enfin, un détecteur de passage à photodiode est placé au niveau du détecteur fixe. Ce détecteur est constitué d'une source lumineuse couplée à une photodiode. Lorsque le couteau (de largeur 1,8 cm) fixé au chariot passe entre la source et la photodiode, l'intensité lumineuse reçue par cette dernière diminue brusquement avant de reprendre sa valeur normale une fois le couteau passé. La tension « créneau » délivrée par le capteur à photodiode est envoyée sur la voie EA₁ de la carte d'acquisition. Ce signal, dont les fronts sont suffisamment raides (cf. sous-paragraphe 2.2. et figure 6), permet de déclencher l'acquisition, *via LATIS-Pro*, du signal issu du récepteur ultrasonore (voie EA₀). Ce signal de synchronisation est envoyé en parallèle sur la centrale de capteurs Pasco, ce qui permet aussi de synchroniser le signal des battements sur celui donnant la position du chariot.

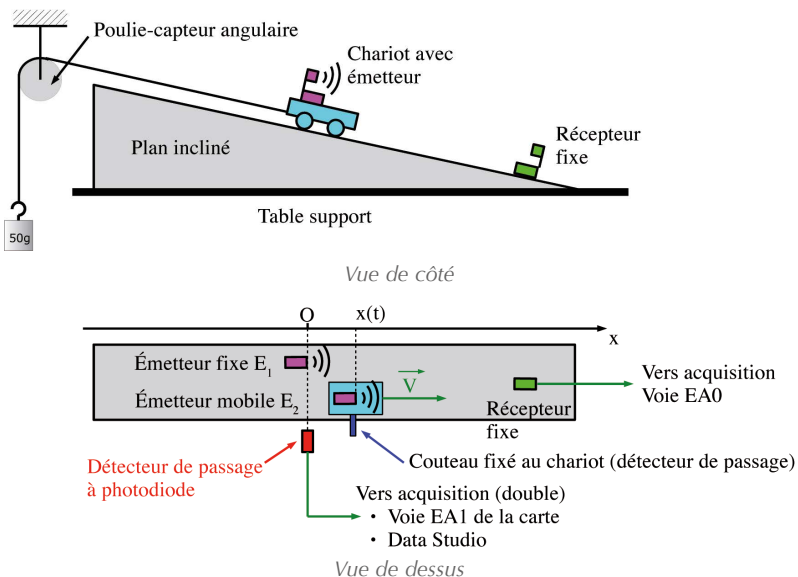


Figure 3 - Schéma de principe de l'expérience.

(2) À cause de la décroissance de l'amplitude en $1/r$, cette disposition permet d'optimiser le contraste des battements (ou des franges d'interférences) en équilibrant les intensités des deux ondes au moment de la détection des battements.

La procédure d'acquisition est alors la suivante :

- ◆ lancer l'acquisition du signal issu du récepteur ultrasonore (voie EA₀) sur *LATIS-Pro*, synchronisé sur le front descendant du capteur de passage ;
- ◆ lancer l'acquisition de la position et du détecteur de passage sur *DataStudio* et lancer le chariot ;
- ◆ lorsque le chariot passe au niveau du détecteur de passage, l'acquisition des battements démarre automatiquement sur *LATIS-Pro*.

À la fin de l'acquisition, on obtient les courbes de la figure 4 sur l'écran. On peut remarquer que le contraste des battements est bien maximum lorsque les deux émetteurs sont côte à côte et que les amplitudes des deux ondes qui se superposent sur le récepteur sont par conséquent identiques. Le contraste diminue dès que la distance entre les émetteurs est plus importante.

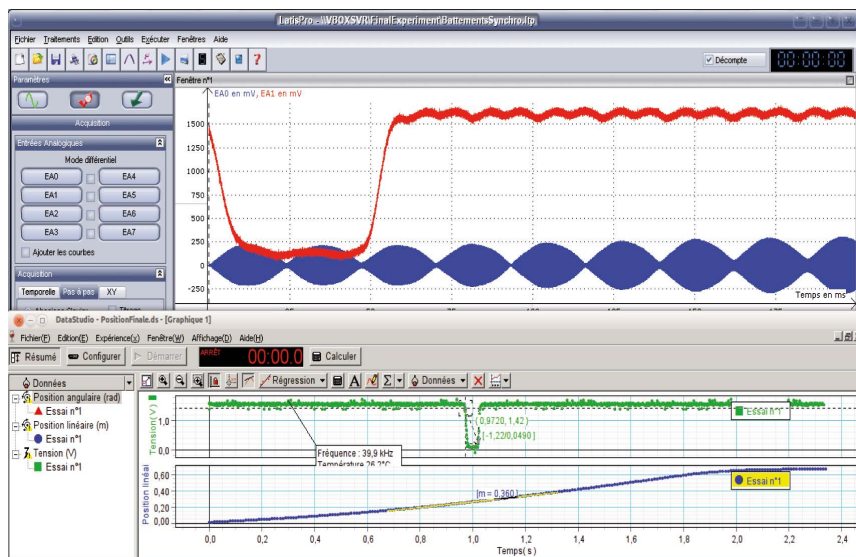


Figure 4 - Capture de l'écran après acquisition.

1.4. Paramétrage des acquisitions, contraintes et conditions de travail

- ◆ *LATIS-Pro* : Cent mille points avec un pas d'échantillonnage de $2 \mu\text{s}$. Avec un signal ultrasonore dont la fréquence est de 40 kHz, donc de période $25 \mu\text{s}$, cela donne une dizaine de points par période. On évite ainsi un sous-échantillonnage qui aurait pour conséquence de ne pas bien rendre compte de l'enveloppe des battements.
- ◆ *DataStudio* : Position avec un pas d'échantillonnage de 10 ms. Tension du détecteur de passage avec un échantillonnage de 1 ms.

- ◆ La température était de $26,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, ce qui donne une vitesse du son de $C = 347\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
- ◆ La principale difficulté de cette expérience réside dans la grande différence qui existe entre les deux pas d'échantillonnage. L'acquisition des battements exigeant une grande résolution, ces derniers ne peuvent être enregistrés que sur une durée très courte, d'où la nécessité d'une synchronisation avec le signal donnant la position du chariot au cours du temps. Ce signal permet de relier des signaux dont l'acquisition a été réalisée par deux logiciels différents.

2. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Il existe trois méthodes pour accéder à la vitesse instantanée, soit en utilisant les positions données par le capteur de position angulaire (transformées en position linéaire), soit en utilisant le signal issu du détecteur de passage, soit en analysant les battements obtenus.

2.1. Utilisation du capteur de position

Il suffit de mesurer la pente de la courbe donnant la position linéaire en fonction du temps avec le logiciel *DataStudio*. Cette mesure est effectuée au moment où le signal issu de la photodiode est minimal. On obtient directement que la vitesse est de :

$$V = 0,360 \pm 0,003\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

L'incertitude provient de l'incertitude sur la position du chariot.

2.2. Utilisation du détecteur de passage à photodiode

On repère la durée sur laquelle la photodiode envoie un signal plus faible. Plus précisément, on repère tout d'abord l'instant t_1 où le signal commence à décroître : dans ce cas, l'avant du couteau commence à masquer la photodiode (situation de gauche de la figure 5). On repère ensuite l'instant t_2 où le signal commence à croître : dans ce cas, l'arrière du couteau commence à faire réapparaître la photodiode (situation de droite de la figure 5).

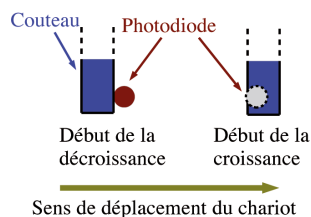


Figure 5 - Détail du passage du couteau sur la photodiode.

Sur la durée $\Delta t = t_2 - t_1$, le chariot s'est donc déplacé de la largeur $d = 1,80 \pm 0,05$ cm du couteau. On mesure sur le signal issu de la photodiode (cf. figure 6) une durée $\Delta t = 49 \pm 1$ ms. On obtient donc une vitesse de :

$$V = \frac{d}{\Delta t}, \text{ soit ici } 0,37 \pm 0,02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Le résultat obtenu est beaucoup moins précis que celui obtenu au moyen du capteur de position.

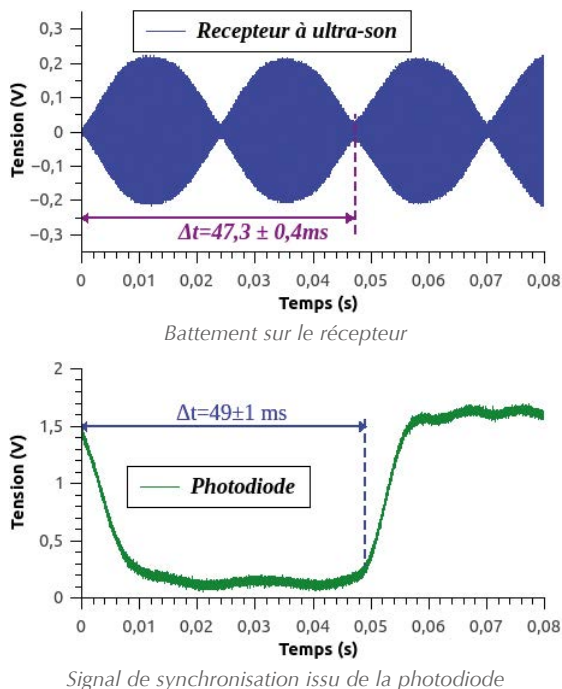


Figure 6 - Détection des battements synchronisés par photodiode.

2.3. Utilisation des battements

Sur le détecteur se superposent deux ondes sonores : celle venant de l'émetteur fixe de fréquence $\nu_0 = 40$ kHz et celle venant de l'émetteur mobile, lié au chariot, dont la fréquence est décalée par effet Doppler. Dans le cas d'un émetteur mobile et d'un récepteur fixe, cette fréquence décalée est donnée par :

$$\nu = \frac{\nu_0}{1 - \frac{V}{C}} \simeq \nu_0 \left(1 + \frac{V}{C} \right)$$

dans le cas où $V \ll C$.

Le décalage de fréquence Doppler est donc de :

$$\Delta\nu = \nu_0 \frac{V}{C} \ll \nu_0.$$

En supposant les amplitudes des deux ondes identiques, on obtient sur le détecteur un signal de la forme :

$$s(t) = A_0 \cos(2\pi\nu_0 t) + A_0 \cos[2\pi(\nu_0 + \Delta\nu)t] \simeq 2A_0 \cos\left(2\pi \frac{\Delta\nu}{2} t\right) \cos(2\pi\nu_0 t)$$

Comme $\Delta\nu \ll \nu_0$, on peut considérer le signal précédent comme un signal de fréquence ν_0 d'amplitude variable⁽³⁾ :

$$A(t) = 2A_0 \left| \cos\left(2\pi \frac{\Delta\nu}{2} t\right) \right|$$

La fréquence de la fonction sinusoïdale dans la valeur absolue (qui n'est autre que l'enveloppe des battements) est donc de $\Delta\nu/2$. On mesure sur la figure 6 (cf. page ci-contre) que :

$$\Delta t = 2/\Delta\nu = 47,3 \pm 0,4 \text{ ms}$$

On obtient donc : $V = \frac{2C}{\nu_0 \Delta t} = 0,368 \pm 0,004 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

On peut aussi interpréter le résultat de l'expérience d'une autre façon, sans faire appel à l'effet Doppler. En considérant, sur la figure 3, que l'émetteur lié au chariot est fixe⁽⁴⁾, on observe sur le détecteur des interférences entre les ondes issues des deux émetteurs avec une différence de marche correspondant à l'abscisse $x(t) = Vt$ du chariot. Déplacer ce dernier permet donc de faire changer l'état d'interférence : la modulation d'amplitude observée au cours du temps sur le détecteur s'interprète donc comme le défilement des « franges brillantes et sombres ». Sur la figure 6 du haut, pendant Δt , l'émetteur lié au chariot s'est déplacé de $x = V\Delta t$.

Ce déplacement correspond à l'écart entre trois « franges sombres » ou interférences destructives (plus précises à repérer à cause du point anguleux introduit par la valeur absolue dans l'expression de l'amplitude). Le déplacement du chariot correspond donc à deux longueurs d'ondes, soit $x = 2\lambda = 2C/\nu_0$. Le rapprochement des deux expressions de x conduit immédiatement à la même expression pour la vitesse du chariot : $V = \frac{2C}{\nu_0 \Delta t}$.

- (3) On peut retrouver ce résultat en calculant la norme du vecteur de Fresnel de l'onde résultante dans le référentiel tournant.
- (4) Cette approximation est valide tant que le déplacement du chariot sur une période acoustique T est négligeable devant la longueur d'onde, ce qui s'écrit : $VT \ll \lambda \Leftrightarrow V \ll C$. On retrouve la même condition d'approximation que celle utilisée dans l'interprétation utilisant l'effet Doppler.

3. VALIDITÉ DE LA MESURE D'UNE VITESSE INSTANTANÉE

Pour que l'analyse des battements puisse effectivement conduire à la mesure d'une vitesse instantanée, il faut que la variation de vitesse V du chariot soit négligeable pendant une durée Δt correspondant à une arche de l'enveloppe des battements, ou entre deux « franges sombres ». La durée nécessaire pour déplacer le chariot d'une longueur d'onde est de $\Delta t = \frac{\lambda}{V} = \frac{C}{V^2 v_0}$. Pendant cette durée, la variation de vitesse $\gamma \Delta t$, où γ est l'ordre de grandeur de l'accélération du chariot, doit être négligeable devant la vitesse V du chariot, soit $\gamma \Delta t \ll V$.

En utilisant l'expression de Δt précédente, on obtient que l'accélération du chariot doit vérifier la condition : $\gamma \ll \frac{V^2 v_0}{C}$.

L'application numérique conduit à une accélération maximale de l'ordre de $\gamma_{\max} = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Étant donné la faible inclinaison du plan incliné et l'effet de lest introduit par la masselotte utilisée pour tendre le fil sur la poulie, on est largement dans les conditions dans lesquelles $\gamma \ll \gamma_{\max}$.

Les mesures obtenues de la position au cours du temps montrent d'ailleurs bien que l'on peut assimiler la vitesse à une constante pendant toute la durée de l'acquisition des battements, c'est-à-dire pendant la durée sur laquelle le couteau coupe l'intensité lumineuse reçue par le capteur à photodiode.

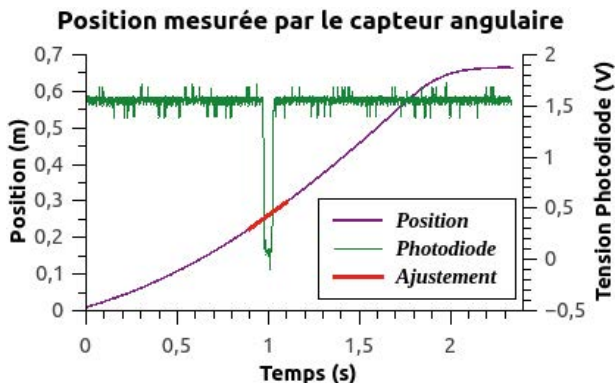


Figure 7 - Position du chariot au cours du temps.

4. EXEMPLE D'ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE POUR LES ÉLÈVES

À partir de cette expérience, il s'agit de concevoir une activité expérimentale pour les élèves. Si on décide de faire monter l'expérience par les techniciens de laboratoire, on se rend vite compte que le bénéfice pour l'élève est réduit au minimum. On a ainsi

un « TP presse-bouton » et l'action de l'étudiant se réduit à appuyer sur deux touches de l'ordinateur pour lancer les acquisitions et à les sauvegarder ou les imprimer pour le traitement ultérieur. Or ici, l'intérêt est essentiellement dans la découverte et la mise en œuvre de ce protocole relativement complexe, bien plus en tout cas que dans le traitement des résultats obtenus.

L'idée naturelle est donc non seulement de faire construire au maximum le montage par les élèves, mais surtout de leur faire découvrir les protocoles expérimentaux utilisés et surmonter les difficultés rencontrées lors de leur mise en œuvre. On choisit donc de proposer un texte relativement succinct, dont voici un exemple possible :

Objectifs

L'objectif est de concevoir et de réaliser un protocole expérimental permettant de mesurer la vitesse instantanée d'un mobile en utilisant les ondes ultrasonores. Cette séance permet de mobiliser un certain nombre de savoir-faire acquis lors des séances précédentes.

Vous avez à votre disposition :

- un plan incliné avec un chariot lesté ;
- un capteur angulaire de position (poulie) relié à une centrale d'acquisition fonctionnant avec le logiciel DataStudio ;
- un GBF, deux émetteurs et un récepteur Moduson ;
- un détecteur de passage à photodiode ;
- une carte d'acquisition et logiciel LATIS-Pro.

Travail à réaliser

- ◆ Imaginer et mettre en œuvre un protocole permettant de mesurer la vitesse instantanée du chariot en utilisant l'effet Doppler.
- ◆ Valider le protocole en comparant la vitesse obtenue précédemment avec celle mesurée en utilisant d'autres méthodes.
- ◆ Présenter oralement le travail réalisé. Rédiger un compte-rendu présentant le protocole retenu et les résultats expérimentaux obtenus.

On rappelle que lorsqu'une source d'onde sonore de fréquence f_0 se rapproche d'un récepteur fixe à la vitesse V , la fréquence reçue par le récepteur est donnée par $f = \frac{f_0}{1 - \frac{V}{C}}$ où C est la vitesse du son.

Il est évidemment difficile de proposer un tel sujet de TP à des étudiants sans préparation. C'est pourquoi, après deux séances préparatoires sur les ondes (interférences, battements), cette activité a été proposée aux élèves sur une séance de travaux pratiques de quatre heures en classe de PCSI (Physique, chimie et sciences de l'ingénieur). Cette

activité a été particulièrement appréciée par les élèves, d'autant plus qu'ils la vivent comme un véritable challenge.

Nous avons fait l'expérience de faire travailler les étudiants par petites équipes de quatre et le fait de travailler ainsi, et non en binôme comme habituellement, a été également apprécié. De plus, comme le problème est ouvert, chacun apporte ses idées, confronte son point de vue avec les autres et un véritable travail en équipe se met en place.

S'il y a évidemment de nombreuses stratégies possibles, on peut néanmoins voir émerger un certain nombre de points communs dans les démarches des élèves :

- ◆ Au début, les élèves commencent par se familiariser avec le matériel, ce qui les amène spontanément à décomposer le problème en tâches élémentaires. Ils commencent par ce qu'ils connaissent le mieux : l'acquisition, par le capteur de position angulaire, de la position en fonction du temps et la détermination de la vitesse au moyen de la pente de la tangente.
- ◆ Puis ils font l'acquisition du signal ultrasonore dont ils mesurent la fréquence. C'est à ce stade qu'ils commencent à appréhender le problème de la synchronisation, à cause de la courte durée de l'acquisition imposée par le pas d'échantillonnage (nécessairement très court) : une acquisition qui durerait toute la descente du chariot saturerait la mémoire.
- ◆ Après une synchronisation « artisanale », l'utilisation du signal issu de la photodiode fait petit à petit son apparition, ainsi que l'utilisation du signal délivré pour mesurer la vitesse du chariot.
- ◆ Avec l'ensemble de la classe, on fait alors le point sur la faible précision de la vitesse obtenue par la mesure directe de la fréquence de l'onde ultrasonore. L'idée de l'utilisation de battements fait alors son apparition.

En fin de séance, la quasi-totalité des équipes a réalisé les trois méthodes sur un même lancer.

EN CONCLUSION

Cette expérience permet de mesurer précisément une vitesse instantanée grâce à la réalisation de battements entre un signal de référence et le signal dont la fréquence est décalée par effet Doppler. D'un point de vue pédagogique, elle montre aux étudiants le cheminement par étapes qui conduit à la construction d'un dispositif expérimental complexe (synchronisation, double acquisition sur deux logiciels différents...).

Pour améliorer ce dispositif, on pourrait penser ajouter un détecteur de crête en

sortie du détecteur ultrasonore⁽⁵⁾. On aurait ainsi uniquement l'enveloppe des battements, dont la faible fréquence permettrait une acquisition sur le même logiciel que le capteur de position.



Fouad LAHMIDANI
Professeur de physique-chimie
Lycée Louis-le-Grand
Paris



Nicolas SCHLOSSER
Professeur de physique
Lycée Louis-le-Grand
Paris

(5) Il faudrait au préalable amplifier le signal pour s'affranchir de la tension de seuil de la diode.