
BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE

Une approche expérimentale des oscillations mécaniques

par Jean-Claude PIVOT
Lycée Le Castel - 21000 Dijon

Un haut-parleur, utilisé à très basses fréquences, permet de réaliser des manipulations très variées pour illustrer les oscillations mécaniques en terminales scientifiques. Celles-ci sont assez légères et assez peu onéreuses pour faire l'objet d'une séance de TP dans la mesure où chaque poste dispose d'un système d'acquisition.

Dans une première partie le HP est lui-même le système oscillant ; dans la seconde, il est l'excitateur d'oscillations forcées.

OSCILLATIONS LIBRES AMORTIES DE LA MEMBRANE D'UN HAUT-PARLEUR

Le principe du haut-parleur a été décrit en seconde, sa réversibilité aussi : le mouvement de sa partie mobile est bien traduit par la tension induite à ses bornes lorsqu'il est utilisé en microphone. La dimension de la membrane et le système de fixation-centrage laisse supposer un amortissement important. Il suffit de frapper très légèrement le caoutchouc de suspension d'un haut-parleur nu pour observer le phénomène.

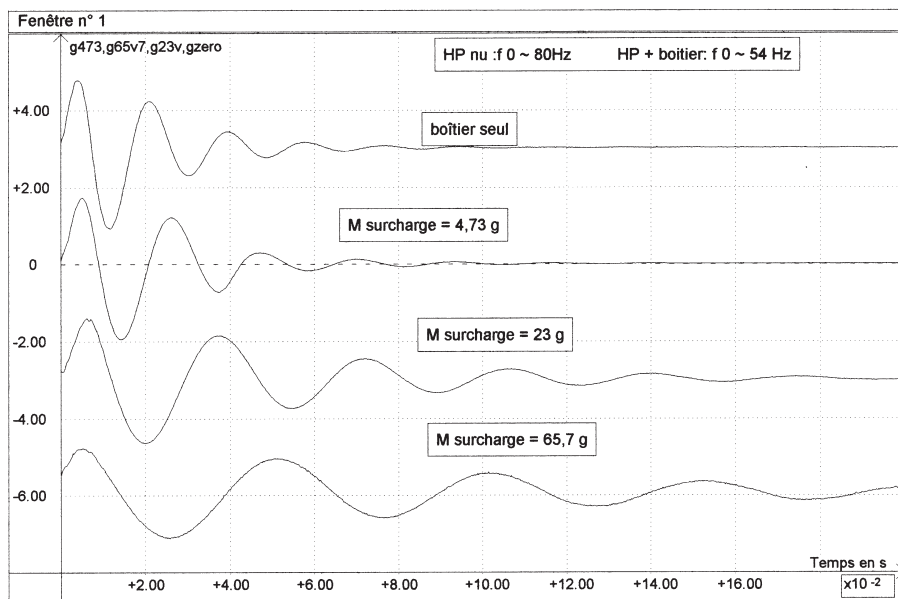
Quelle est l'influence de la masse en mouvement sur les oscillations ?

On a collé un petit boîtier aux dimensions du cache poussière à notre haut-parleur de 10 cm de diamètre (cf. photo 1). La fréquence propre est passée de 80 à 54 Hz environ. Il est alors facile d'alourdir la membrane et de mesurer l'évolution de la pseudo-période (cf. document 1).



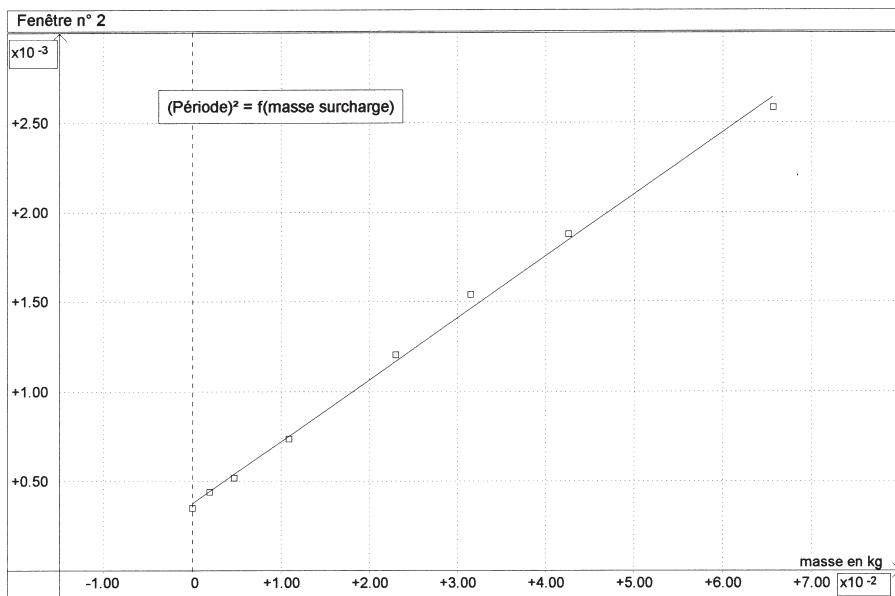
Photo 1

 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE



Document 1 : Les oscillations du haut-parleur équipé d'un boîtier d'environ 5 g alourdi par des bouchons de caoutchouc percés du laboratoire de chimie. Ceux-ci doivent être coincés ou fixés par un ruban adhésif.

 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE



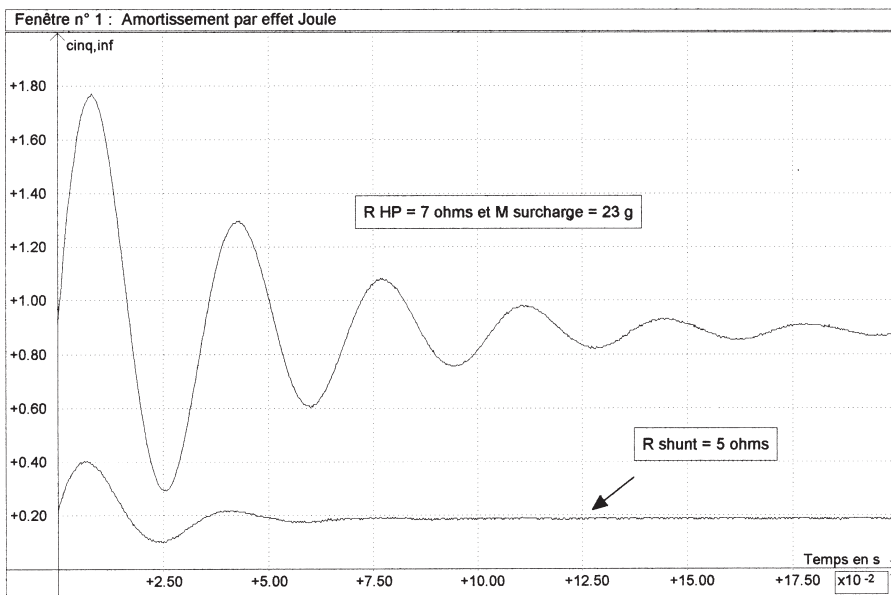
Document 2 : Établie à partir de huit mesures, la courbe $T^2 = f(M_{\text{surcharge}})$ est assez satisfaisante pour que l'on en recherche l'équation par la fonction modélisation du logiciel.

Celle-ci ($T^2 = 3,45 \cdot 10^{-2} M_s + 3,75 \cdot 10^{-4}$) permet d'en déduire un ordre de grandeur de la masse de la partie mobile du haut-parleur (4,5 g), celle du boîtier (5,5 g) ainsi que la constante de raideur du système de suspension de la bobine-membrane (1100 N/m !) connaissant $T_0 = 1,25 \cdot 10^{-2}$ s sans boîtier et $T'_0 = 1,86 \cdot 10^{-2}$ s avec boîtier.

La question du nombre d'oscillations observées est généralement sans réponse. Le bilan énergétique est délicat car les courbes ne sont que des images de la variation de la vitesse des masses en mouvement.

Pour compléter cette réflexion, on augmente la dissipation d'énergie vers l'extérieur du système en shuntant le haut-parleur (7 Ω) par une résistance assez faible (5 Ω pour le document 3).

 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE



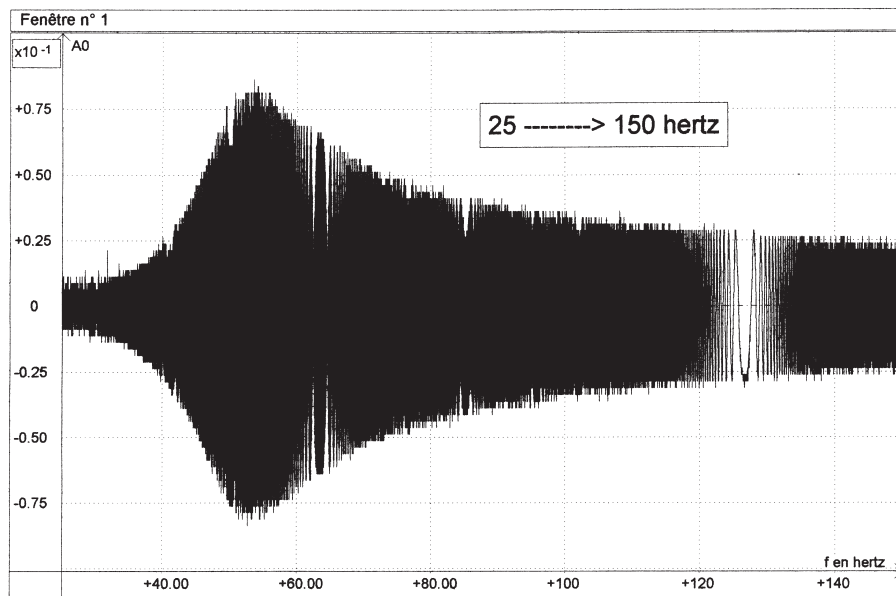
Document 3 : La dissipation d'énergie par effet Joule modifie notablement l'amortissement.

OSCILLATIONS FORCÉES DE LA MEMBRANE D'UN HAUT-PARLEUR

Notre haut-parleur toujours équipé du boîtier est placé à une dizaine de centimètres devant un deuxième haut-parleur lui faisant face. Ce dernier est alimenté par un GBF wobulé en une minute de 10 à 150 Hz. On enregistre alors la tension induite aux bornes du premier. La résonance observée est celle du haut-parleur étudié : il suffit d'effectuer des permutations avec des HP de caractéristiques différentes ou de remplacer le HP récepteur par un microphone pour en être convaincu.

Cette dernière remarque n'est plus valable dès qu'on élargit la gamme aux fréquences audibles (voir annexe).

 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE



Document 4 : Réponse de la membrane d'un haut-parleur de fréquence propre 54 Hz à une excitation acoustique dont la fréquence varie de 10 à 150 Hz. On observe la résonance à la fréquence attendue.

OSCILLATIONS D'UN PENDULE ÉLASTIQUE

L'excitation est provoquée par un ou deux haut-parleurs selon le montage. Pour réaliser une bonne étude quantitative le GBF doit être stable et ajustable au troisième chiffre aux fréquences très basses imposées par le matériel (entre 1 et 2 Hz).

L'acquisition du mouvement peut se faire avec une cuve rhéographique lorsqu'on tient à une bonne description de l'équation horaire mais l'amortissement risque d'essommer la résonance notamment pour le montage utilisant le banc à coussin d'air. Il suffit alors de fixer un petit aimant (punaise magnétique de bureau) sur le mobile ; une petite bobine sans noyau placée à l'endroit de la position d'équilibre permet d'avoir accès à la vitesse maximum du mobile.

BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE

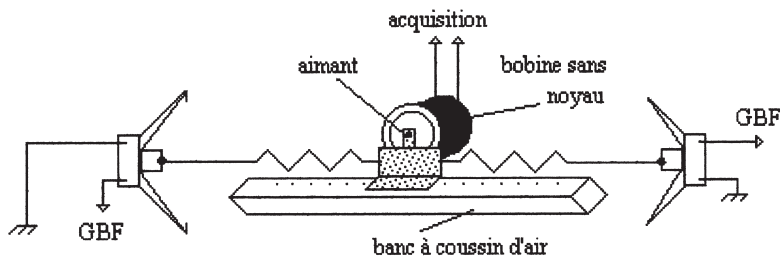


Figure 1 : Lorsque les deux haut-parleurs, en opposition de phase, provoquent une excitation de quelques millimètres, l'amplitude du mouvement du mobile est de plusieurs centimètres à la résonance avec nos ressorts de $k = 7,15 \text{ N/m}$. Le montage laisse deviner que la masse des ressorts (5,5 g chacun) intervient dans le calcul de la fréquence propre théorique, la masse du mobile est de 65 g seulement. La bobine dont les dimensions ne sont pas respectées sur le schéma provient d'un relais de récupération.

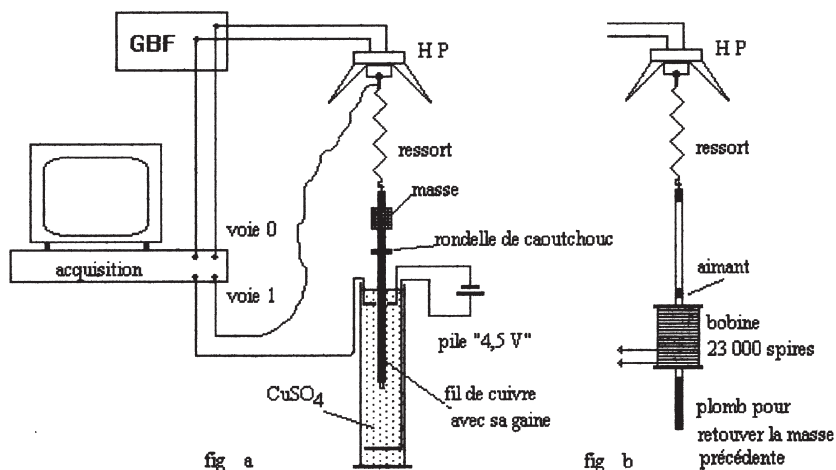
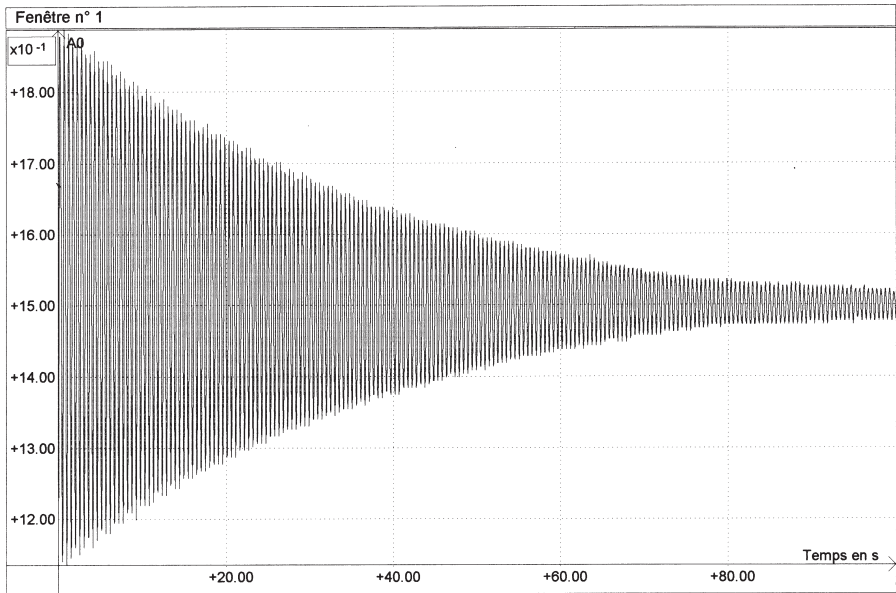


Figure 2 : Le mouvement de la masse accrochée au ressort est enregistré par l'intermédiaire d'une électrode (fil gainé sauf à son extrémité) dans une éprouvette «rhéographique» contenant une solution de sulfate de cuivre très diluée.

La masse suspendue assez faible (42,6 g pour les mesures qui vont suivre) laisse la membrane du haut-parleur très près de sa position d'équilibre à vide.

Une rondelle de caoutchouc d'environ 1 cm de diamètre est glissée sur l'électrode mobile. En déplaçant celle-ci dans la partie immergée, on accentue l'amortissement (trois fois environ) sans changer la masse en mouvement. La comparaison des courbes de résonance en est facilitée (voir le document 7).

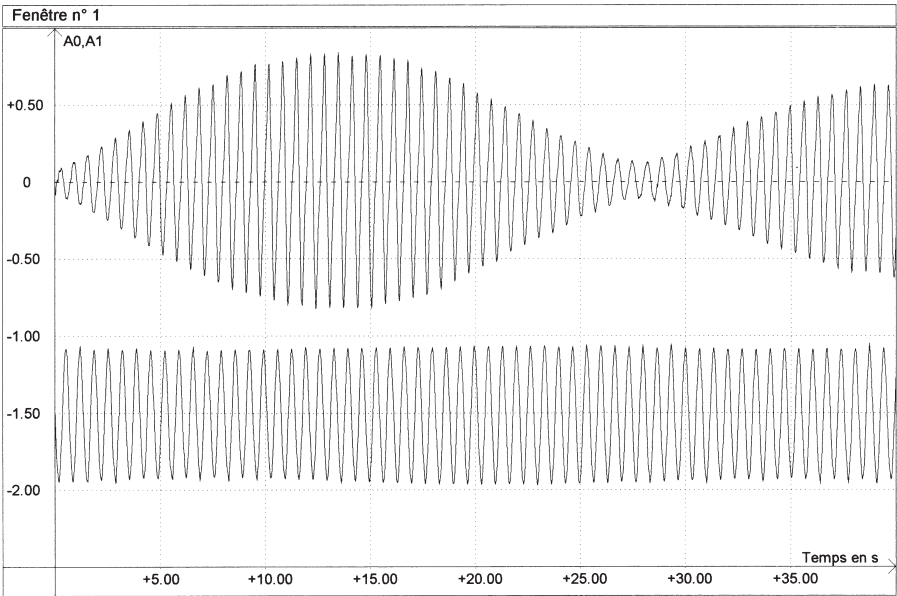
 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE



Document 5 : Enregistrement de cent secondes d'oscillations libres avec la rondelle non immergée (figure 2a). L'amortissement fluide est déjà important.

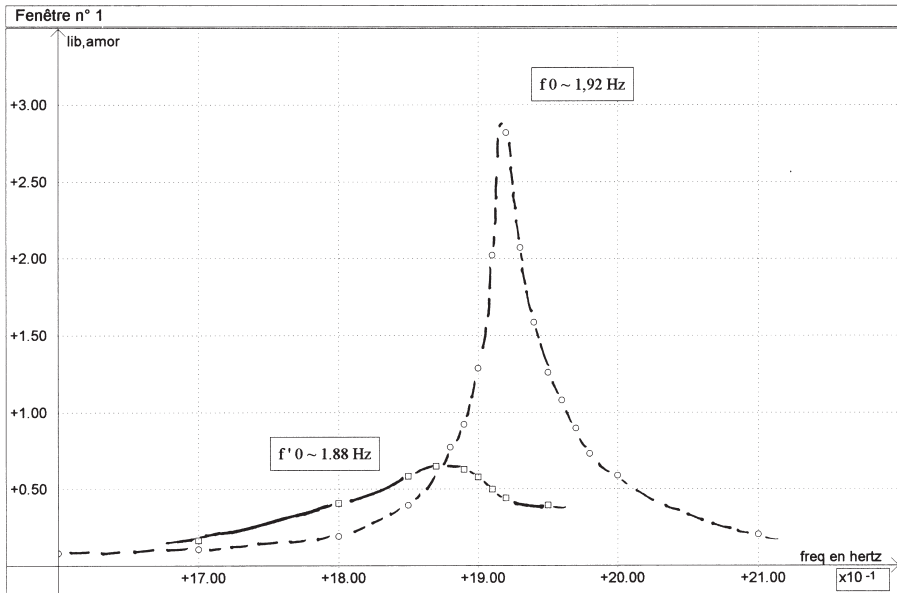
Le système proposé figure 2b donne un amortissement très faible (environ cinq fois plus petit que le précédent) mais la tension obtenue n'est plus sinusoïdale.

BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE



Document 6 : Exemple d’acquisition avec le montage de la figure 2b. La tension induite a été amplifiée dix fois. On observe des battements très marqués comme sur le banc à coussin d’air. La courbe du bas de l’écran est celle de la tension excitatrice envoyée au haut-parleur.

 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE



Document 7 : Exploitation des mesures effectuées avec le montage de la figure 1a. L'affichage simultané de l'acquisition permet de révéler le premier maximum d'oscillations, départ immobile. Les mesures des tensions crête à crête notées sur papier sont exploitées dans le tableau de notre logiciel*. Les courbes sont obtenues rondelle immergée et non immergée. On observe évidemment un léger décalage entre les affirmations du GBF et celles de l'ordinateur quant aux fréquences propres, mesurées sans excitation dans le second cas. Quel est l'appareil le plus exact des deux ?

Pour clore le chapitre de la résonance mécanique par une image ludique, le haut-parleur est transformé en pompe à air. Un couvercle percé du bon diamètre et un peu de ruban adhésif suffisent. Le souffle, inspiration et expiration, est rythmé par un GBF. Celui-ci est dirigé vers un manomètre à eau sommaire ; le système oscillant que représentent les 20 cm³ d'eau est très amorti, il est très facile de trouver la résonance aux environs de 2 Hz. Le souffle est dirigé maintenant vers une balançoire, pendule simple très peu amorti en comparaison. La recherche de la résonance à 1,23 Hz pour ce montage demande alors beaucoup plus de précision : «l'allongement» des battements prévient de

* PHYSCOPE et SYNCHRONIE distribués par EUROSMART

 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE

l'imminence de celle-ci. Des acquisitions simultanées avec bobine et aimant faciliteront l'entreprise.

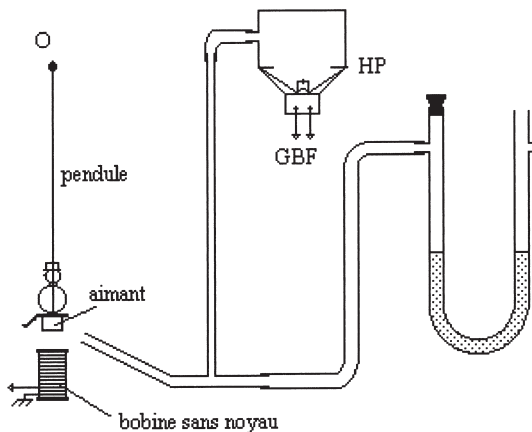


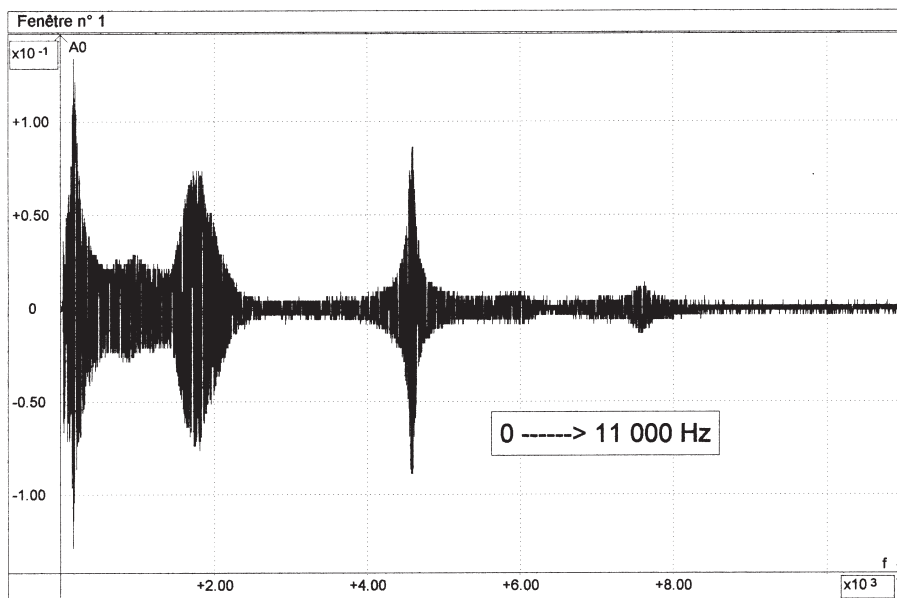
Figure 3



Photos 2 et 3 : Deux situations particulières réalisées avec la même amplitude de la tension du GBF. A la résonance dans le manomètre (~ 2 Hz) la balançoire reste quasiment immobile. En revanche lorsque celle de la balançoire est obtenue (1,23 Hz) les oscillations non négligeables dans le tube en U permettent de suivre les phases d'inspiration (photo) et d'expiration. L'expérience peut être sonorisée en remplaçant le manomètre par une flûte à bec !

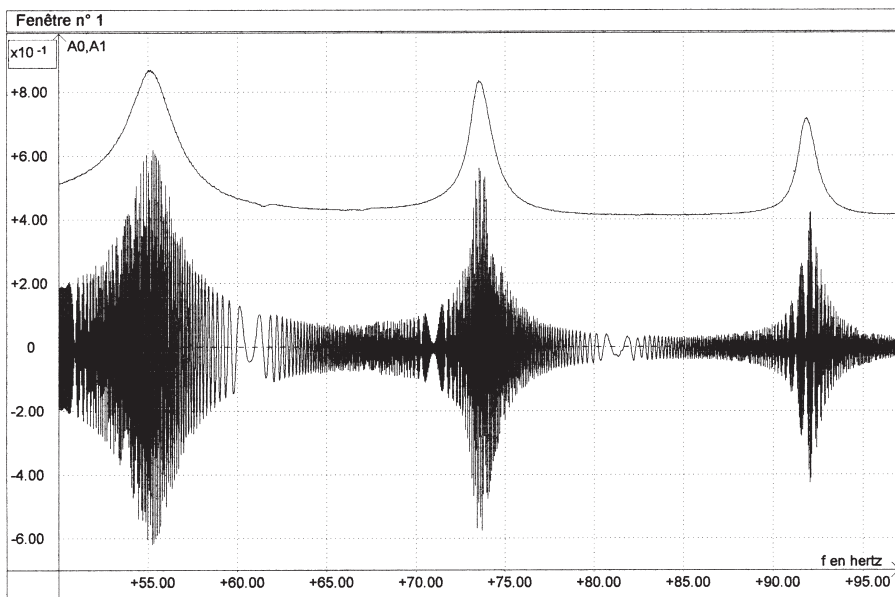
BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE

Annexe 1



Document 4 bis : Ce couple de haut-parleur et la tranche d'air qui les sépare donnent naissance à des résonances multiples lorsqu'on élargit la gamme à l'essentiel des fréquences audibles.

 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE



Document 4 ter : Le phénomène précédent est simplifié en tendant modérément un ressort entre les membranes des deux haut-parleurs. Lorsque la wobulation est assez lente on a le temps d'observer pour certaines fréquences de belles ondes stationnaires longitudinales. L'enregistrement simultané de la tension induite aux bornes du haut-parleur récepteur directement et après un détecteur de crêtes met en évidence la périodicité des fréquences de résonances. L'étude des lasers est abordée avant l'heure !

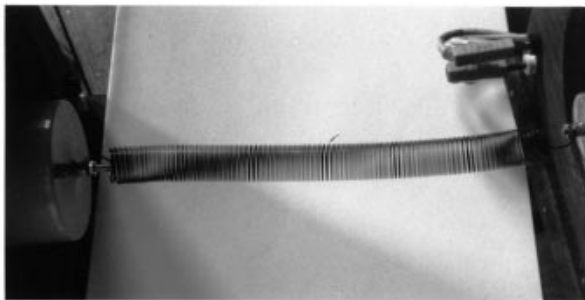


Photo 4 : Ondes stationnaires longitudinales à 74 Hz.

BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE

Annexe 2

Lorsqu'on ne dispose pas du film de la rupture du pont de Tacoma et que la gyroscope à lame du lycée est un peu fatigué, il suffit de fixer à un haut-parleur une canette de boisson gazeuse découpée (avec une paire de ciseaux de bureau) pour illustrer le phénomène de résonance mécanique.



Photo 5