Vincent GILET

Antoine POURCHEZ

L'accord des timbales

SY21 : ***Grandeurs physiques et leurs mesures*** **automne1999**

Remerciements

Nous tenons particulièrement à remercier Monsieur René CAUSSE, chercheur à l'I.R.C.A.M. pour son aide précieuse et sa disponibilité.

Sommaire

Remerciements 2

I. Généralités sur les timbales 5

1. **Hauteur de note déterminée** 5
2. **Systèmes d'accord actuels** 5
3. **La peau** 6

II. Le problème 6

1. **Inefficacité des accordeurs actuels** 7
2. **Nouvelle aide à l'accord à trouver** 7

III. Etude acoustique 8

1. **Qu'est-ce que le son ?** 8
2. **Qu'est-ce qu'un son " musical " ? Qu'est-ce qu'une note ?** 8
3. **Que se passe-t-il quand la baguette heurte la membrane ?** 8
4. **Analyse du son d'une timbale** 11

IV. Les paramètres à prendre en compte 12

1. **Les grandeurs physiques** 12
2. **L'aspect financier** 13

V. Nos solutions 13

1. **Mesure directe de la fréquence sur la membrane** 13
   - a- Position des lignes nodales *14*
   - b- Choix des technologies *17*
     - **Potentiomètre résistif** 18
     - **Capteurs capacitifs** 20
     - **Jauges de contrainte** 23

apourche@etu.utc.fr - giletvin@etu.utc.fr

c- Le matériel disponible sur le marché ……..…..*25*

Potentiomètre résistif ……..…….. 27

Capteurs capacitifs ……..…….. 28

Jauges de contrainte ……..……..28

d- Les problèmes liés àla méthode ……..…….. *29*

2. Mesure indirecte de la fréquence via la tension …… 29

a- Où ? ……..……...*30*

b- Comment ? ……..……..*30*

Les jauges ……..……..30

La piezzorésistance ……..31

c- Le matériel disponible ……..……...*32*

Les jauges ……..……...33

La piezzorésistance ……..……..*33*

d- Contraintes et limites ……..……..……..*34*

VI. Notre proposition ……..…….....35

Bibliographie ……..…….……..36

Annexes ……..…..…….. 37

I. Généralités sur les timbales

1. Hauteur de note déterminée

Les timbales sont considérées comme l'instrument de percussion le plus important des orchestres modernes. Le timbalier joue dans un orchestre symphonique sur 3 à 5 timbales de tailles différentes, et donc de possibilités d'accord différentes. Par exemple, la Grande messe des morts de Berlioz nécessite 16 timbales et pas moins de 10 timbaliers ! Berlioz fut l'un des premiers à apprécier la musicalité de la timbale. Effectivement, comme peuvent le constater le constater les spectateurs dotés d'une oreille musicale, la grosse caisse produit un son grave, mais à hauteur non déterminée (comme la caisse claire, la cymbale…). La timbale est le seul instrument à percussion doté d'une membrane (avec les Tablas indiens) qui possède une hauteur de note déterminée.

2. Systèmes d'accord actuels

Au début du XXème siècle, l'accord des timbales a été possible pour la première fois grâce à une innovation technique : un système de tirants à vis rendant l'accord possible en début de morceau par le musicien. Par la suite, de nombreux mécanismes ont été développés pour rendre plus facile l'accord de la timbale. Les timbales les plus modernes ont un mécanisme de tension de la peau commandé par une pédale avec 6 ou 8 tirants tout autour de la membrane (cf. fig. 1). La pédale permet de faire varier la tension d'un facteur de 3 à 1 ce qui correspond à une sixte sur la portée musicale.

La vue de dessus (cf. fig. 1) montre les huit vis disposées sur la circonférence de la caisse et qui permettent d'accorder l'instrument sur environ un octave. Le cercle en pointillés indique l'ouverture au fond de la caisse (pas dans tous les modèles). La coupe de profil montre le mécanisme de tension actionné par une pédale et qui permet au timbalier de modifier l'accord au cours du jeu.

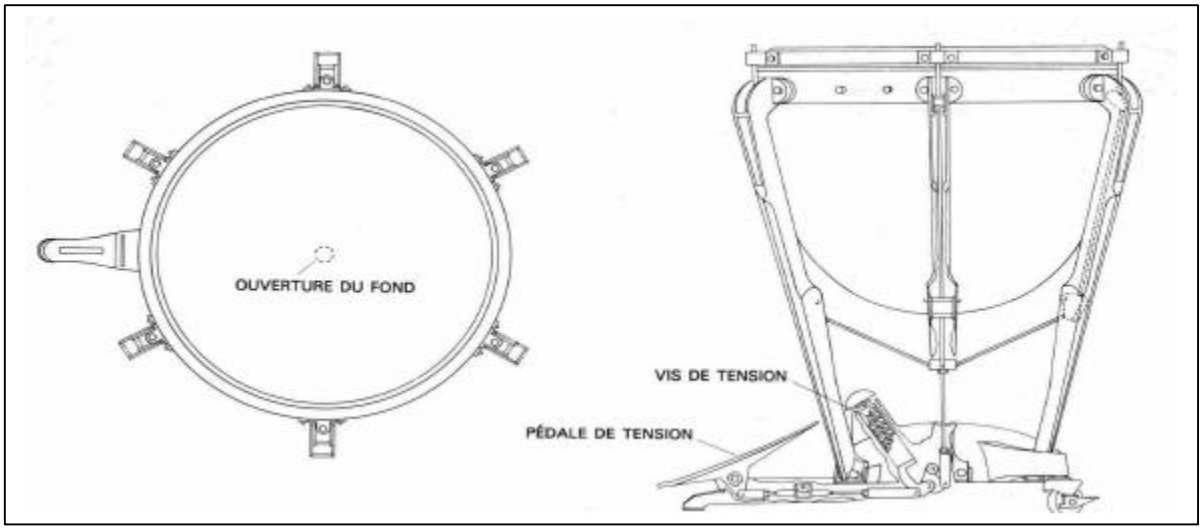


Figure1 : Vues de dessus et de profil d'une timbale

3. La peau

Jadis, la plupart des membranes étaient en cuir de veau ; elles sont désormais de plus en plus en mylar (polyéthylène terephthalate). Le cuir de veau nécessite une très grande attention, et une grande expérience pour les accorder correctement. Le mylar est insensible à l'humidité et beaucoup plus facile à accorder grâce à son homogénéité. Une épaisseur de 0 .19 mm est considérée actuellement comme LE standard.

II. Le problème

La timbale est un instrument de plus en plus utilisé dans les orchestres : tous les compositeurs modernes la connaissent et savent l'apprécier ; d'où leur présence dans toutes les compositions actuelles. Effectivement, la timbale est le seul instrument à percussion doté d'une membrane qui possède une hauteur de note déterminée. Les écritures modernes exploitant au maximum les possibilités de cet instrument, elles exigent, pour la plupart plusieurs modifications d'accord au cours de l'exécution d'un morceau.

La musique n'étant pas exclusivement réservée aux musiciens dotés d'une oreille fine : « l'oreille absolue », la question de l'accord juste des timbales se pose pour de nombreux timbaliers.

1. Inefficacité des accordeurs actuels

Il existe actuellement sur le marché un système commun à tous les instruments à hauteur déterminée basé sur la captation du son par un microphone : l'accordeur.

Ce système, pour être efficace, exige un silence absolu. Or, dans le cas qui nous concerne, le timbalier doit modifier l'accord en cours de jeu. Ceci exclut donc la solution traditionnelle du microphone.

2. Nouvelle aide à l'accord à trouver…

On se propose donc de trouver un autre moyen pour guider le timbalier dans l'accordage de son instrument. Un tel système pourrait, en outre, ouvrir de nouveaux horizons pour les compositeurs : utilisation des quarts de ton, possibilité de jouer des mélodies aux timbales…

Intuitivement, pour résoudre notre problème, nous sommes amenés à nous poser quelques questions d'ordre général comme :

- *Qu'est-ce qu'une note ?*
- *Qu'est-ce qu'un son « musical » ?*
- *Comment le son est-il produit par la timbale ?*
- *Que se passe-t-il lorsque la baguette heurte la membrane de l'instrument ?*

apourche@etu.utc.fr - giletvin@etu.utc.fr

III. Etude acoustique

1. Qu'est-ce que le son ?

Le son est un ébranlement périodique de l'air; une suite de compressions et de dépressions qui se propage de proche en proche, à 340m/s dans l'air à 18°C. Une oreille humaine ne perçoit que les sons dont les vibrations sont comprises entre 16 et 20000 Hz (c'est-à-dire que les vibrations de l'air doivent effectuer entre 16 et 20000 oscillations par seconde pour être perçues par une oreille humaine saine).

Un son est rarement "pur", on n'entend quasiment jamais une seule et unique fréquence. Les sons complexes sont composés d'une fréquence fondamentale et d'harmoniques et de transitoires. Ces dernières sont celles qui donnent le timbre d'un son, cela permet de reconnaître plusieurs instruments jouant la même note.

2. Qu'est-ce qu'un son " musical " ? Qu'est-ce qu'une note ?

Un musicien caractérise un son par sa hauteur, son timbre et son intensité. La hauteur de la note est la fréquence fondamentale du son. Le spectre d'audition a été divisé arbitrairement en octaves. 10 octaves couvrent la plage de 16 à 16744 Hz.

Un son musical est un son dont les fréquences des harmoniques ont de "bons rapports" avec la fréquence de la fondamentale. Il faut entendre par "bons rapports", des rapports entiers ou du type 1.5, 2.5, 3.5, ...

Les musiciens ont fixé les bonnes harmoniques par rapport aux fondamentales et leur ont donné des noms: quinte, septième majeure, octave ...

3. Que se passe-t-il quand la baguette heurte la membrane ? (les modes de vibration)

Les modes d'une membrane circulaire idéale (dans le vide, sans caisse de résonance, sans perte, …).

Du point de vue musical, une analogie est possible entre la corde d'un violon, par exemple, et une membrane. Dans les deux cas, la tension fait vibrer l'ensemble après l'application d'une pression, soit par l'archet, soit par la baguette sur l'élément vibrant. Pour

une corde, la tension s'exerce linéairement et on la règle au moyen d'une cheville. Dans le cas de la membrane, la tension est exercée sur la circonférence. On appelle nœ ud d'une corde vibrante, tout point demeurant immobile pendant que le reste de la corde est en mouvement. Pour les membranes, le principe est le même, à ceci près que les nœ uds ont une dimension : ce sont les lignes nodales.

Une membrane circulaire présente deux types de lignes nodales :

- des **cercles concentriques** avec la circonférence,
- et des **diamètres**.

D'un point de vue mathématique, ceci se démontre par l'équation de l'onde :

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = c^2\left(\frac{\partial^2 z}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial z}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 z}{\partial \Phi}\right)$$

$$C = \sqrt{\frac{\text{Tension}}{\text{densité surfacique}}}$$

Les solutions que l'on trouve pour cette équation sont les fonctions de Bessel d'ordre m.

$$\frac{d^2R}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dR}{dr} + \left(\frac{w^2}{c^2} - \frac{m^2}{r^2}\right)R = 0,$$

$$\frac{d^2\Phi}{df^2} + m^2\Phi = 0.$$

Ces fonctions $J_0(x)$, $J_1(x)$, …, $J_m(x)$ s'annulent pour plusieurs valeurs de x (cf. fig.2).

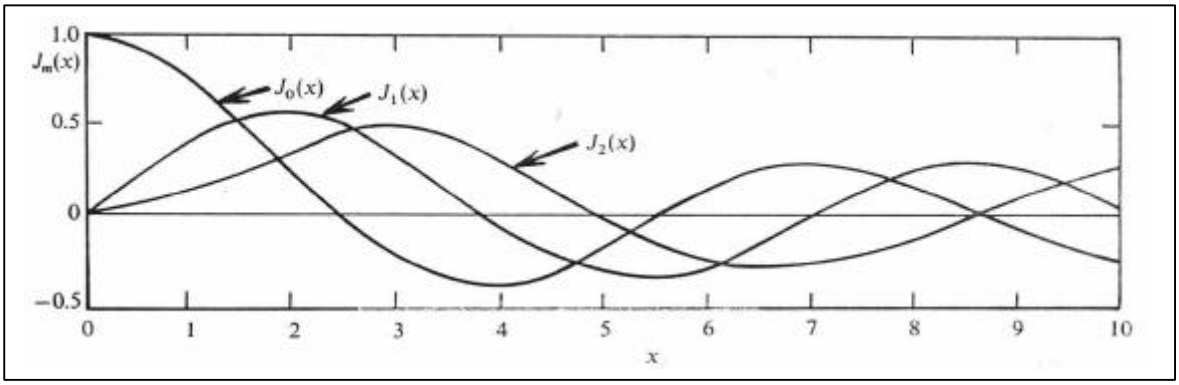
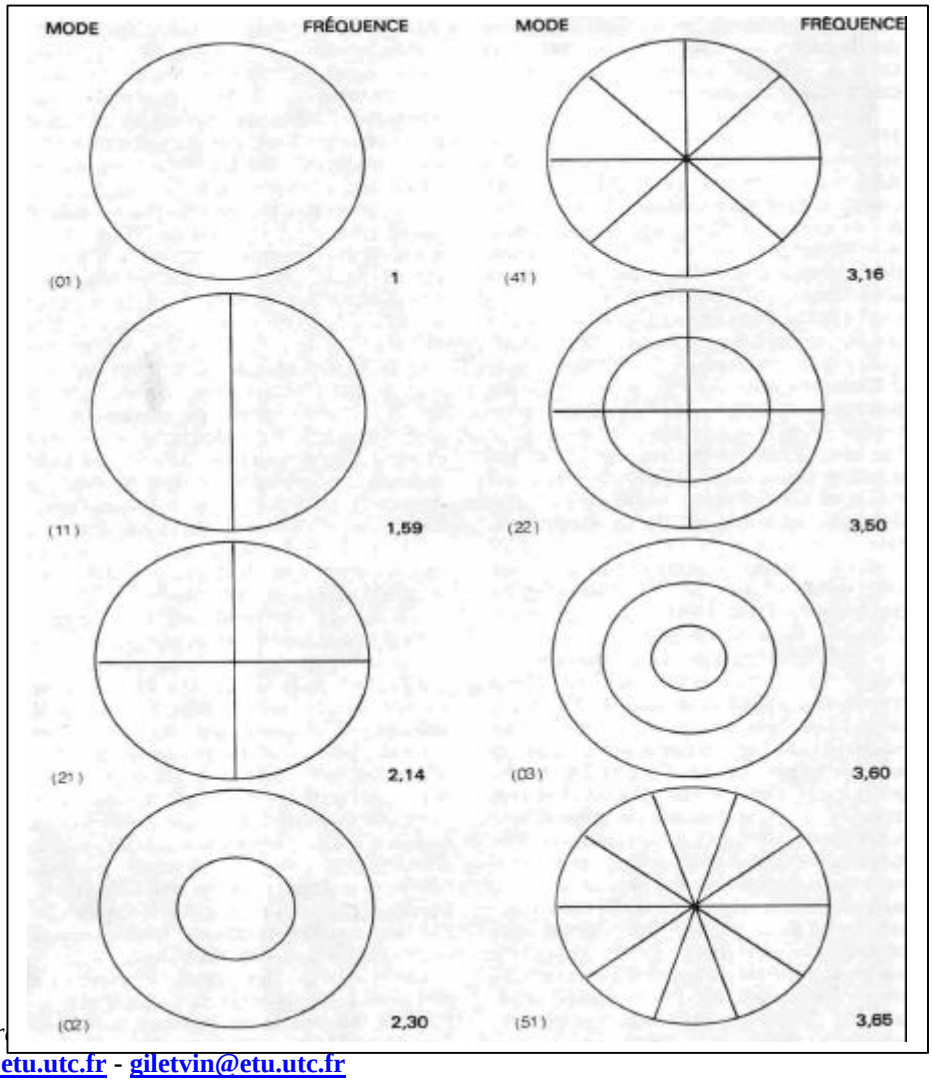


Figure2 : zéros de la fonction de Bessel.

Le n^{iéme} zéros de la fonction J d'ordre m donne la fréquence du mode m,n pour une membrane idéale. m correspond au nombre de diamètres nodaux, et n correspond au nombre de cercles, y compris la circonférence.

Par exemple, quand la vibration de la membrane ne produit qu'une ligne nodale située sur la circonférence, on désigne le mode par (0,1). Si l'on prend ce mode comme mode fondamental d'une membrane idéale, on lui attribue la valeur 1. Le deuxième mode correspondant à la fréquence supérieure la plus proche, a une ligne nodale circulaire et une ligne nodale diamétrale : on le désigne donc par (1,1). Dans une membrane idéale, la fréquence de ce mode est égale à 1.59 fois celle du mode fondamental.

Le mouvement d'ensemble de la membrane vibrante est une composition des lignes nodales des différents modes. Par exemple, dans le mode 01, la membrane se déplace toute entière vers le haut et vers le bas, dans le mode 11, les deux moitiés de la membrane se déplacent en sens contraire. De façon évidente, ce mouvement est d'autant plus complexe que le nombre de modes augmente.



apourche@etu.utc.fr - giletvin@etu.utc.fr

Figure 3 : Les lignes nodales

4. Analyse du son d'une timbale

Le son musical, c'est-à-dire de hauteur bien déterminée, doit posséder plusieurs composantes harmoniques fortes :il est composé d'une fréquence fondamentale, mais aussi de plusieurs harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale. L'équation de Bessel impose que les modes successifs de vibration d'une membrane idéale ne sont pas des multiples entiers de la fondamentale. En effet, pour une membrane idéale, les modes ont les rapports suivants :

1 :1.59 :2.14 :2.30 :2.65…

$$f_{mn} = \frac{1}{2p}\frac{j_{mn}\ c}{a}$$

avec - $\mathbf{j_{mn}}$ = le nième zéro de la fonction de Bessel d'ordre m

- **c** = (Tension/densité surfacique)^0.5

- **a** = le rayon de la membrane

Ceci est remarquable dans le son d'une grosse caisse : il est impossible de discerner la hauteur du son produit.

Qu'est-ce qui différencie une grosse caisse d'une timbale ? Une timbale bien accordée, frappée au bon endroit, un son principal fort et au moins deux harmoniques. Lord Rayleigh (1894) a découvert que le son principal est produit par les vibrations du mode (11). C'est donc la fréquence de ce dernier qui conditionne la fréquence, et donc la hauteur de la note produite. Il a identifié, par la suite, trois harmoniques successives : une quinte parfaite (mode (21)), une septième majeure (mode (31)) et une octave (mode (12)) au-dessus du son principal.

Des mesures ont permis de démontrer que les modes (11), (21), (31), (41) et (51) d'une timbale ont des fréquences dont les rapports sont à peu près les suivants : 1 :1.5 :2 :2.5 :3 ; ce qui donne à la timbale sa musicalité.

Mode mn	Fréquence mn calculée en Hz	Fréquence mn expérimentale en Hz	Fmn/F11 calculée	Fmn/F11 expérimental
11	172	*172*	1.00	*1.00*
21	261	*258*	1.52	*1.50*
31	344	*340*	2.00	*1.97*
41	427	420	2.48	2.44
51	506	*501*	2.94	*2.91*

Figure 4 . Fréquences modales calculées et expérimentales pour une tension égale à 5360N/m sur une timbale donnée.(Ludwig, diamètre 26 pouces) (de Christian et al. 1984).

Comment des modes non-harmoniques pour une membrane idéale deviennent-ils harmoniques pour une timbale ? La cause principale de ceci provient de la pression que l'air exerce sur la membrane. Deux autres effets dont l'importance est moindre affinent les fréquences de la timbale : l'effet de l'air enfermé dans la caisse de la timbale (il a ses modes de vibration propres qui peuvent interférer avec ceux de la membrane) et la raideur de la membrane (elle tend à élever la fréquence des harmoniques les plus hautes).

IV. Les paramètres à prendre en compte

1. Les grandeurs physiques

Quelles sont les grandeurs physiques disponibles sur une timbale ?

- Le **son** : la timbale émet des sons dont la plage de fréquences est [50 ;3000Hz] ; Notre sujet exclut l'utilisation du son (cf. Le problème)
- La **tension de la peau** : On a vu que la hauteur de la note dépend de la tension de la membrane. La tension peut varier de 1300 N/m à 5400N/m.

- Le **mouvement de la peau** ; on peut s'intéresser au déplacement d'un point de la membrane ; l'amplitude du déplacement est de l'ordre du mm. On peut également se pencher sur le côté vibratoire du mouvement de la peau : le mouvement est périodique dans les fractions de seconde qui suivent la frappe, on peut mesurer cette fréquence. Les vibrations que l'on va mesurer ont des fréquences qui peuvent varier dans une plage similaire à celle du son.

Compte tenu de l'étude précédente, il apparaît qu'il existe un lien direct entre la fréquence de la note souhaitée et la fréquence du mode (11). ($F_{note} = F_{(11)}$).

La question est donc de trouver un moyen de connaître la fréquence de ce mode.

Pour ce faire, deux solutions se sont présentées à nos yeux :

- **mesure directe** de la fréquence sur la membrane
- **mesure indirecte** : il existe une relation entre la tension imposée à la membrane et la fréquence de vibration, en effet, il paraît clair que plus la membrane est tendue, plus la note est aiguë.

2. L'aspect financier

Dans tous les cas il faut tenir compte de la contrainte prix : On estime que les timbaliers seront prés à débourser environ 15% du prix de la timbale en plus pour avoir un système performant d'accordage. Une timbale d'environ 1 mètre de diamètre coûte entre 30000 et 40000 F, ceci nous laisse donc une marge de manœ uvre n'excédant pas 4500F à 6000F.

Cette argent servira d'une part à acheter le ou les capteurs nécessaires, et d'autre part à financer l'appareillage électronique qui servira à traiter les informations émanant des capteurs.

V. Nos solutions

1. Mesure directe de la fréquence sur la membrane

Cette méthode consiste à capter les mouvements de la peau. En effet, par ce moyen, nous pourrions connaître la fréquence de vibration du mode 11, qui donne par relation directe,

la fréquence de la note produite. Nous allons donc nous intéresser aux moyens de connaître et de déterminer cette fréquence.

La première question qui se pose est « OU capter cette vibration ?».

Ensuite, nous verrons COMMENT capter ces fréquences : les différentes technologies .

Puis AVEC QUOI ; quel capteur utiliser avec quelles caractéristiques.

Enfin, les CONTRAINTES et les LIMITES de cette méthode.

Les **difficultés prévisibles** de cette solution sont les suivantes :

- où peut-on placer le capteur sur la peau ? Combien faut-il en placer ?

  En effet, la position des lignes nodales dépend de l'endroit de l'impact de la baguette. Il convient donc d'imposer au timbalier une zone de frappe (le timbalier sera-t-il d'accord pour accepter une trace de marqueur sur la membrane ?).
- De nombreuses interférences vont perturber la mesure du capteur.

  En effet, le mode 11 n'est pas le seul à vibrer à un endroit donné… On devra avoir recours à un traitement du signal pour gérer les problèmes de perturbations.

a- Position des lignes nodales en fonction de l'impact de la baguette.

On a vu que le son de la timbale est conditionné et généré par la fréquence de vibration du mode (11) dominant principalement, et par une série d'autres modes dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence du mode (11) : ce sont les modes (21), (31), (41) … . Les autres modes sont négligeables. Comment repérer l'amplitude maximale de vibration du mode (11) en sachant que les autres modes sont présent au même moment et en fonction de la zone de frappe sur la membrane ?

Etudions la position des lignes nodales en fonction de l'impact et du mode:

- **mode (11)**

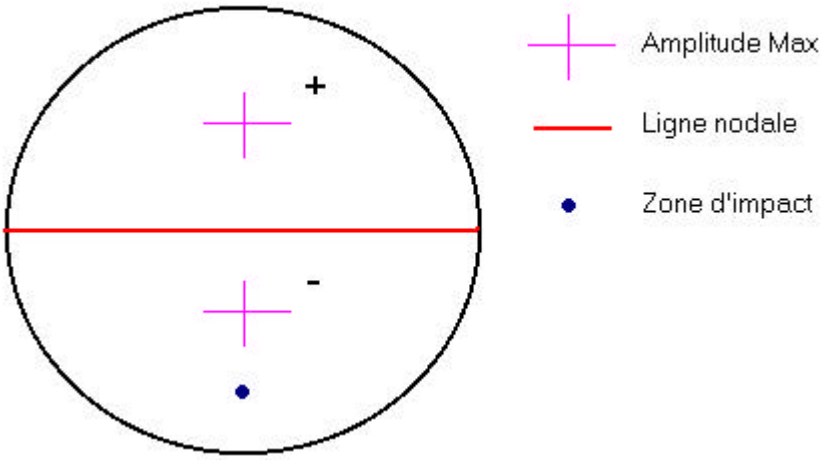


Figure 5 : 1 diamètre et 1 cercle

La ligne nodale est le plus éloignée possible de la zone d'impact : la ligne nodale est une zone qui reste immobile.

L'amplitude maximum est au milieu du diamètre perpendiculaire à la ligne nodale.

- **mode (21)**

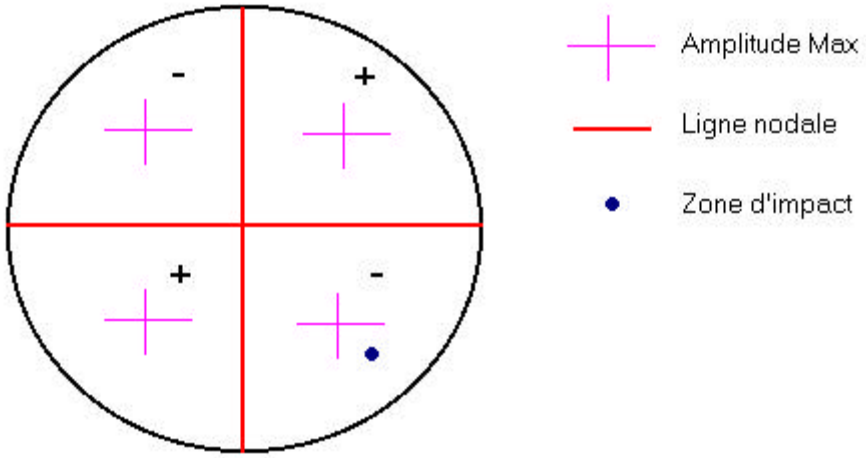


Figure 6 : 2 diamètres et 1 cercle

- **mode (31)**

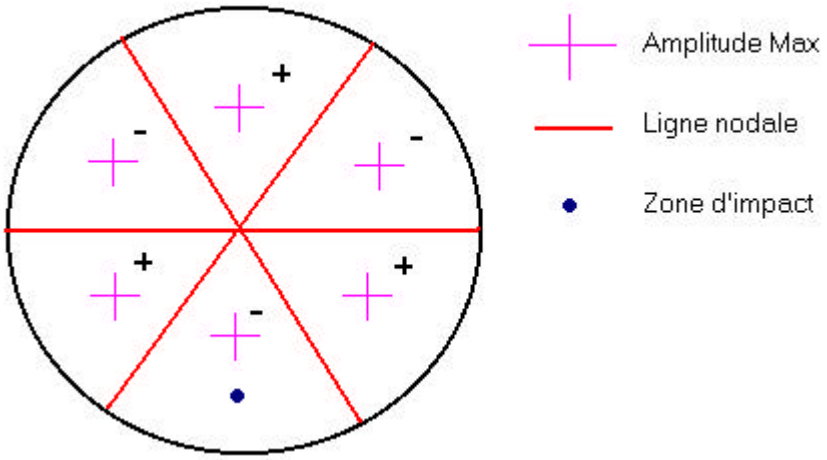


Figure 7 : 3 diamètres et un cercle

- **mode (41)**

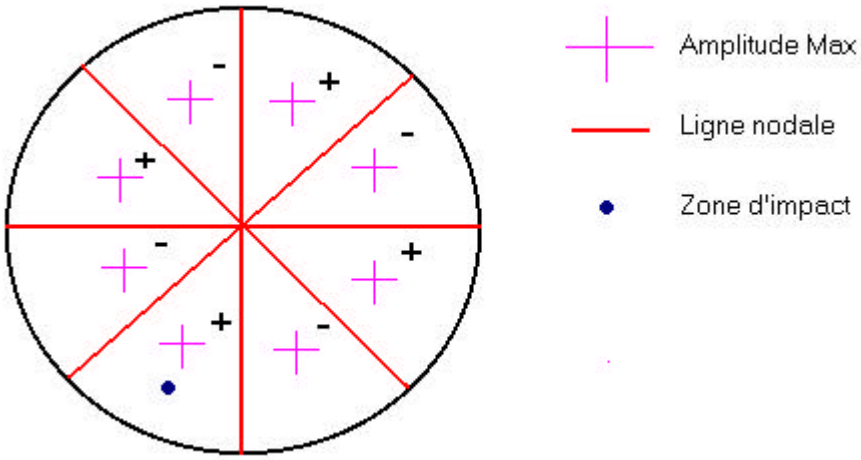


Figure 8 : 4 diamètres et un cercle

De façon intuitive, on suppose que le schéma de vibration de la membrane est la somme des mouvements des modes précédemment étudiés. Il est clair que deux zones de vibration maximales sont communes à tous ces schémas pour un même point d'impact (*cf figure 9*). C'est donc sur ces zones que l'on va faire nos mesures de fréquences. Cependant, la fréquence de vibration de ces zones est une fonction de la vibration de tous les modes, et pas

seulement du mode (11). Il faudra donc soumettre la fréquence mesurée à un filtre pour en déduire la fréquence du mode (11), et donc la fréquence de la note ($F_{note} = F_{(11)}$).

On s'attardera pas sur l'étude de ce filtre, mais il est clair que c'est lui qui va conditionner l'efficacité de ce dispositif.

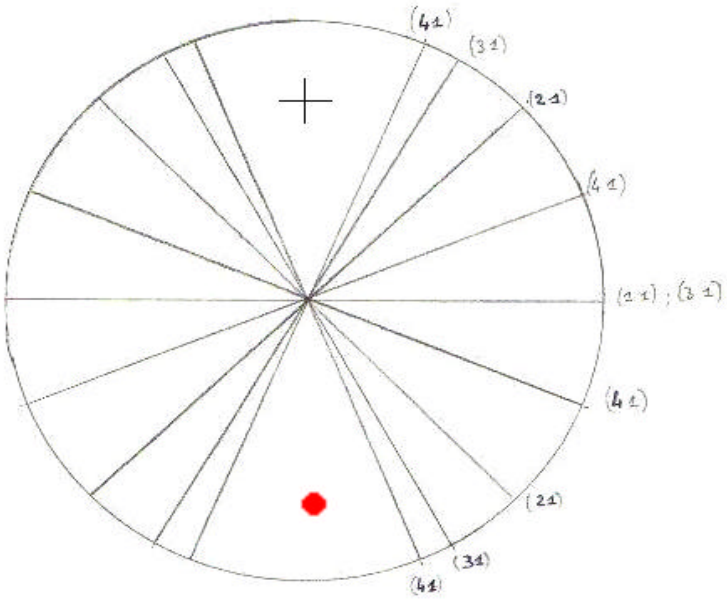


Figure 9 : Superposition des modes

b- choix des technologies

Nous allons donc nous pencher sur le déplacement d'un des deux points dont l'amplitude est maximale. On mesure le déplacement relatif de ce point par rapport à sa position d'équilibre. La fréquence sera déduite du nombre de passages à cette position par seconde.

Il est souhaitable d'effectuer la mesure sur un point le plus proche possible du point de maximum d'amplitude pour que le signal soit plus net.

Nous allons donc nous attarder quelques instants sur les différentes technologies mises à notre disposition pour capter ce déplacement :

- **Potentiomètre résistif**

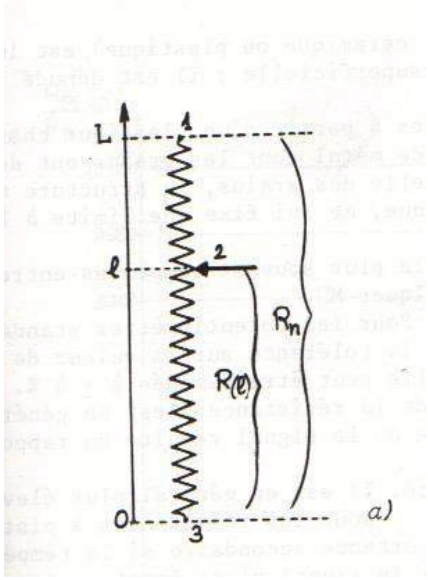


Figure 10 : Potentiomètre rectiligne

a) principe

Le potentiomètre est constitué d'une résistance fixe Rn (cf. schéma du potentiomètre), sur laquelle se déplace un curseur. La position de celui-ci détermine la valeur de la résistance en sortie. Or, le mouvement du curseur est lié à celui de la membrane.

La valeur de la résistance R entre le curseur et l'une des extrémités fixes dépend donc

- Du mouvement du point de la peau sur lequel est fixé notre capteur.
- Du type de potentiomètre que l'on utilise. En effet, on distingue deux catégories de potentiomètres : ceux à déplacement rectiligne ; la résistance R dépend de **L** (la position du curseur) et suit la relation suivante : (on note au passage qu'il s'agit d'une relation linéaire)

$$R(\mathbf{L}) = (\mathbf{L} / L) * Rn$$

Et ceux à déplacement angulaire, dont on tire la relation suivante

$$R(\alpha) = (\alpha / \alpha M) * Rn ;$$

b) description des éléments du potentiomètre

- La résistance est constituée soit d'un fil bobiné soit d'une piste conductrice. Le fil doit avoir les propriétés suivantes : coefficient de température de la résistivité et f.e.m. thermoélectrique avec le cuivre faibles, résistance à la corrosion. On utilise des alliages du type Ni-Cr, Ni-Cu, Ni-Cr-Fe, Ag-Pd.

La piste conductrice est fabriquée à partir d'un plastique chargé par une poudre conductrice de carbone ou de métal.

- Le curseur a pour mission d'assurer un bon contact électrique ; c'est-à-dire qu'il ne doit pas générer de f.e.m. de contact. Il est également nécessaire qu'il ne présente pas de résistance de contact trop importante, pour éviter une usure trop rapide, surtout lorsqu'il est soumis à de fortes vibrations.

c) Caractéristiques métrologiques

- **course électrique utile** : plage entre laquelle le potentiomètre a un comportement linéaire par rapport au déplacement de la membrane.

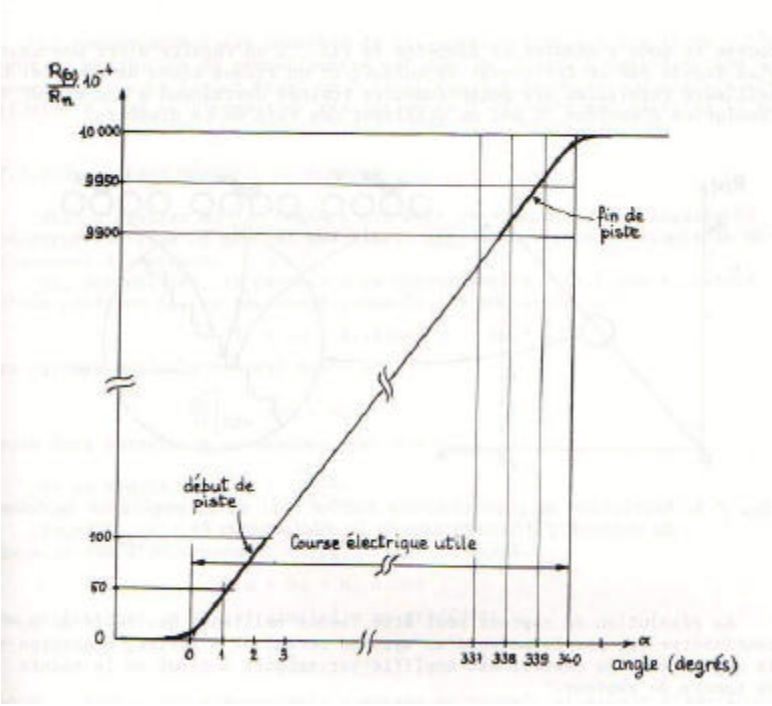


Figure 11 : linéarité du potentiomètre

- **Résolution** : les meilleurs potentiomètres dans ce domaine sont ceux à piste conductrice. En ce qui concerne notre timbale, il apparaît que de bonnes qualités de résolution seront nécessaires, car l'amplitude du mouvement que nous voulons observer est relativement faible (quelques dixièmes de mm).

- **Vitesse maximale du curseur** : les constructeurs fixent à leurs appareils une limite Umax à la vitesse de déplacement du curseur. Ce paramètre est

extrêmement important à prendre en compte ; étant donné que la fréquence de vibration de la peau peut atteindre 3000Hz.

Par exemple, pour un potentiomètre à déplacement rectiligne, si l'amplitude du mouvement (autour d'une position d'équilibre **L** 0) du curseur est $\mathbf{L}_1$, nous avons $\mathbf{L} = \mathbf{L}_0 + \mathbf{L}_1 * \sin(wt)$ $(w = 2.\Pi.f)$

La vitesse maximale est donc $w.\mathbf{L}_1 < Umax$.

D'où $f<Umax/2\Pi\,\mathbf{L}_1$

Par un calcul similaire, on obtient pour un potentiomètre à déplacement angulaire : $f < Nmax . 360/2\pi\alpha 1$

d) avantages et inconvénients

Les capteurs de ce type présentent de nombreux avantages compte-tenu de l'usage que nous prévoyons. Ils sont d'un encombrement faible, ce qui est nécessaire, pour ne pas affecter le son de la timbale, néanmoins, il convient de vérifier les différents modèles disponibles au cas par cas, pour ce qui est de la mise en place.

En ce qui concerne la fiabilité, la robustesse et surtout le coût, ils présentent de nombreux attraits. Quant à l'usure due aux frottements, il apparaît que ces capteurs peuvent atteindre 10^e6 manœuvres pour les potentiomètres à fil bobiné et 5.10^e7 pour ceux à piste plastique. Il semble raisonnable d'estimer que, quel que soit le type d'appareil que nous choisirons, sa durée de vie sera suffisamment longue pour satisfaire l'utilisateur…

- Capteurs capacitifs

a) Principe

Il s'agit de condensateurs dont l'une des armatures subit le déplacement à traduire, ce qui entraîne une variation de sa capacité. On distingue deux types de condensateurs : les condensateurs cylindriques et les condensateurs plans.

Le déplacement de l'armature peut s'effectuer :

- dans le cas d'un condensateur plan soit dans son propre plan (A variable, D constant), soit perpendiculairement à son plan (A constant, D variable).

$$C = \frac{e_r . e_0 . A}{D}$$

Er : permittivité relative du milieu entre les armatures

A : surface en regard des armatures

D : distance entre les armatures

- dans le cas d'un condensateur cylindrique, uniquement parallèle à l'axe (l variable)

$$C = \frac{2pe_r . e_0 . l}{Log \frac{r_2}{r_1}}$$

l : longueur d'enfoncement des cylindres l'un dans l'autre.

r1 : rayon du premier cylindre

r2 : rayon du second cylindre

Ces capteurs capacitifs ont une constitution très simple ce qui permet des réalisations robustes et fiables.

Ces capteurs sont caractérisés par - la sensibilité de la capacité :

$$S_C = \Delta C / \Delta x$$

- la sensibilité de l'impédance :

$$S_Z = \Delta Z / \Delta x$$

- la sensibilité relative :

$$S_r = \frac{1}{C} . \frac{\Delta C}{\Delta x} = -\frac{1}{Z} . \frac{\Delta Z}{\Delta x}$$

b) condensateur à surface variable

Il s'agit soit d'un condensateur plan avec armature tournante, soit d'un condensateur cylindrique dont une armature est translatable le long de l'axe.

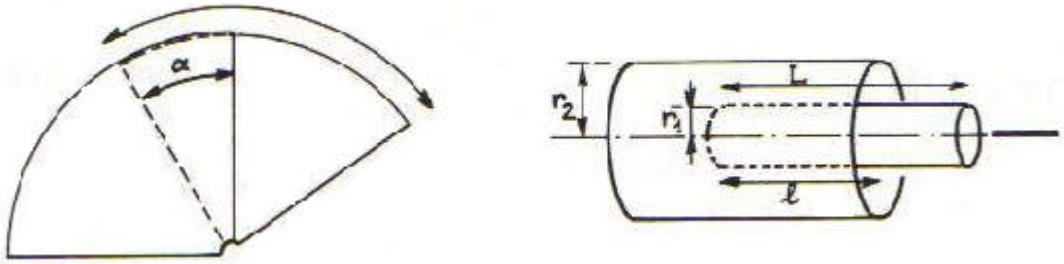


Figure 12 : Deux types de capteurs capacitifs

Dans les deux cas, il existe une relation de linéarité entre la capacité C et le déplacement X (en degré ou en mètre) :

$$C(x) = K \cdot X$$

La sensibilité Sc est constante : Sc = K

c) condensateur à écartement variable

Il ne peut s'agir que d'un condensateur plan destiné à traduire un déplacement rectiligne.

Il en existe de deux sortes :

- Condensateur unique

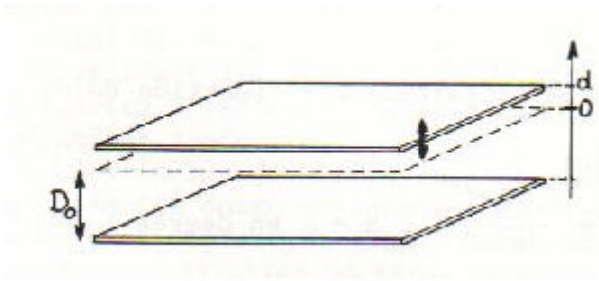


Figure 13 : Condensateur plan unique

$$C(d) = \frac{e_0 . A}{D_0 + d}$$

$$S_z = -\frac{1}{e_0 . A . w}$$

C'est la variation d'impédance qui, dans ce cas, est linéaire en fonction du déplacement.

La sensibilité du condensateur à écartement variable est très supérieure à celle du condensateur à surface variable. Par contre, le condensateur à écartement variable ne peut être utilisé que pour des étendues de mesure faibles (inférieures au mm) alors que les condensateurs à surface variable a une étendue de mesure nettement plus importante (supérieure au cm).

- condensateur double différentiel

L'armature mobile A1 est déplacée perpendiculairement à son plan entre deux armatures fixes A2 et A3.

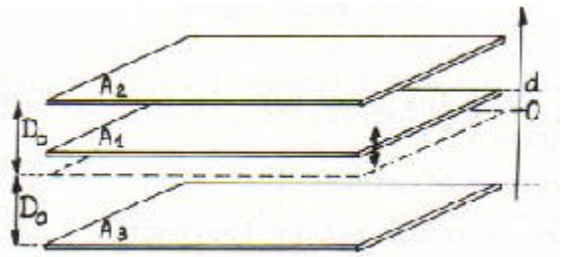


Figure 14 : Condensateur plan double

C'est l'association de ces deux condensateurs qui présentes des propriétés intéressantes (rapport des Capacités fonction linéaire de rapport des distances).

d) Méthodes de mesure de variations de capacité

Il existe un certain nombre de méthodes applicables à des condensateurs uniques. Ces dernières sont basées sur les propriétés de l'amplificateur opérationnel, des oscillateurs sinusoïdaux ou de relaxation.

Nous ne rentrerons pas dans le détail de ces méthodes.

- Jauges de contrainte

a) Le principe

Nous avons pensé également à une jauge qui serait collée à même la peau: Cette dernière nous donne une variation de la résistance en fonction de sa déformation. Le nombre de passages au zéro par seconde nous donnera la fréquence. Existe-t-il des jauges qui ont un

temps de réponse assez rapide pour traduire les mouvements des fréquences les plus élevées (env. 3000Hz) ? Nous traiterons ce problème dans la partie suivante.

Le principe de cette méthode est de repérer les déformations de la peau causées par les vibrations. Les jauges sont régies par la loi suivante :

$$\frac{\Delta R}{R} = K\frac{\Delta L}{L}$$

Où R est la valeur de la résistance de la jauge et L est l'étirement linéaire de la jauge.

K est le facteur de jauge. C'est une constante propre à chaque jauge qui dépend de μ, coefficient de Poisson et de la constante de Bridgman, c.

Il est clair que dans notre cas, seul le nombre de passages au zéro par seconde de ΔR/R nous importe. En effet, la peau est animée d'un mouvement périodique et passe donc par sa position d'équilibre. Le nombre de fois où elle passe à cette position par seconde correspond à sa fréquence de vibration.

b) Le fonctionnement

Nous fixerons notre jauge dans l'une des zones mises en évidence plus haut.

La réponse en fréquence n'est pas déterminée par le matériau de la jauge (le silicium transmet des vibrations au-delà de 10^{6} Hz, ce qui est largement suffisant pour nos ondes acoustiques…) mais par le procédé de fixation et par les dimensions de la jauge : il faut en effet que la longueur L des brins soit très inférieure à la longueur d'onde λ des vibrations mécaniques de façon que la déformation mesurée soit quasi uniforme sur l'étendue de la jauge.

La relation suivante a été établie :

L<<0.1λ ;

Cependant, la mesure reste possible mais se trouve perturbée jusqu'à L=0.2λ.

La longueur d'onde λ de la vibration étudiée précédemment a pour expression λ=V/f
Où est sa fréquence et V la célérité du son dans le matériau (dans la cas de l'acier, V=5810 m/s). Compte tenu de la règle adoptée, la fréquence maximale pour laquelle on peut utiliser une jauge dont le brin a une longueur L est :

$$f_{\max} = \frac{V}{10L}$$

Par exemple pour l'acier, la fréquence maximale est égale à 60KHz lorsque L=1cm.

Dans notre cas, nous avons vu que la fréquence maximale à déceler est de l'ordre de 3000Hz ; ce qui est largement dans les cordes de la plupart des jauges. Après calcul, pour une jauge en acier, il faut que les brins de la jauge soient inférieurs à 19cm… Il nous faut évidemment plus petit… (La fréquence maximale augmente de fait). Le paramètre à prendre en compte avec le plus d'attention est donc la longueur L des brins.

c) Les différentes formes des jauges

Il existe des associations de jauges fixées sur un même support et dons les brins font entre elles des angles parfaitement définis. Elles sont utilisées quand on souhaite connaître simultanément les déformations dans plusieurs directions.

Lorsque les directions principales sont inconnues, comme c'est le cas ici, il faut pour les déterminer mesurer les déformations dans trois directions :lorsque l'une des directions principales est présumée probable, on utilise des rosettes à 45°. (*cf figure15-b*), la jauge centrale étant alignée avec cette direction. D'autres rosettes à deux jauges sont adaptées à la mesure des déformations de torsion (*cf figure15-d*). Enfin, il existe des rosettes spécialement destinées à la mesure des déformations de membranes (*cf figure15-e et f*).

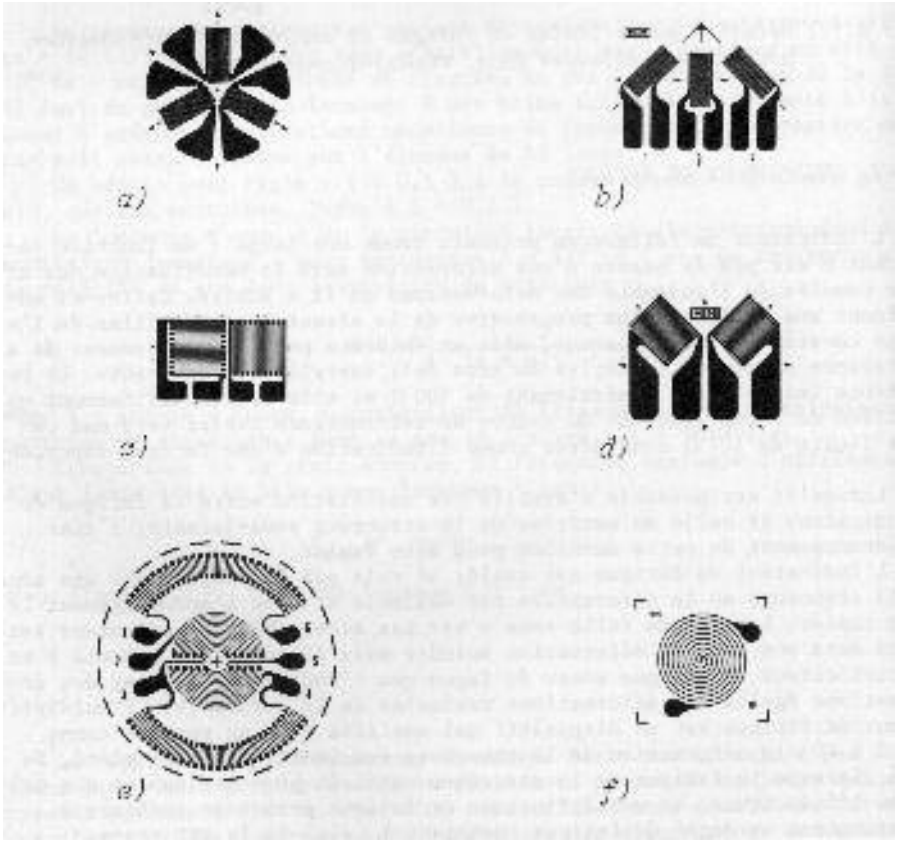


Figure 15 : Différents types de rosettes

c- le matériel disponible sur le marché

Pour toutes ces méthodes, nous avons les **exigences** suivantes :

- **Le prix** : Comme vu précédemment, il serait souhaitable que le prix soit inférieur à environ 1500 F (compte tenu de l'instrumentation supplémentaire indispensable pour analyser les résultats du capteur).
- **l'encombrement** : Pour cette méthode, il est clair que les capteurs seront disposés à l'intérieur de la caisse de résonance. Nous avons procédé à la manipulation suivante :

Nous avons placé un manche à balais (diam 2,5 cm, longueur 50 cm) dans la caisse de résonance de la timbale en passant par le trou du fond (*cf figure 16*). Après avoir fait écouter le son obtenu au professeur de percussion du conservatoire d'Amiens, nous n'avons constaté aucune différence entre le son avec et sans balais. Notre instrumentation sera donc disposée à l'intérieur de la timbale, et les fils passeront par le trou au fond de la caisse.

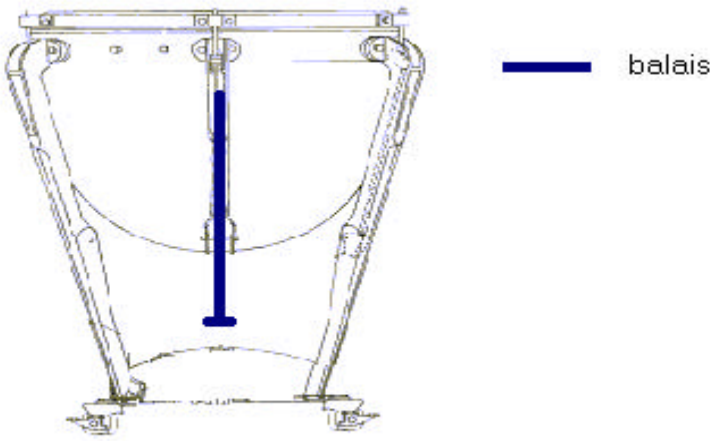


Figure 16 : Expérience du balais

- **l'étendue de mesure** : Nous estimons que le point sur lequel nous allons faire la mesure est animé d'un mouvement rectiligne d'amplitude maximale d'environ 0.1 mm (si on ne joue pas excessivement fort).

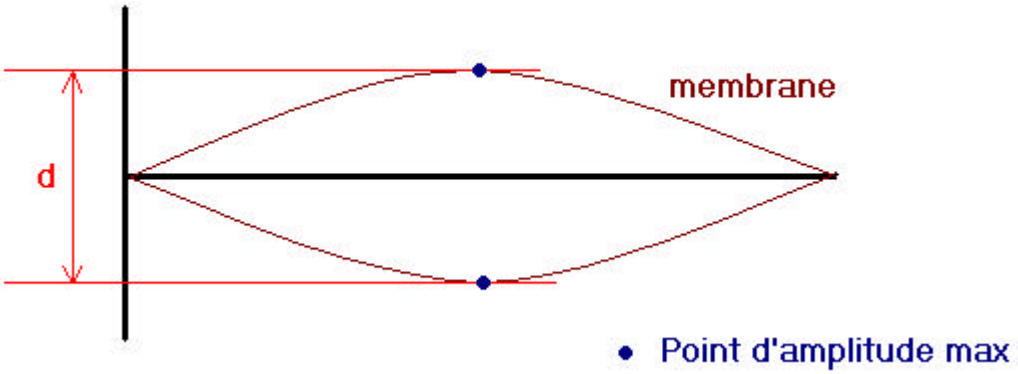


Figure 17 : Mouvement de la membrane

- **la précision** : On rappelle que ces capteurs vont nous donner des informations sur un déplacement de faible amplitude, qui seront ensuite exploitées pour renseigner le timbalier sur la hauteur de la note. Il s'agit donc d'avoir une marge d'erreur la plus fine possible pour la gamme de prix visée.
- **la fréquence maximale d'utilisation**: Les notes les plus aiguës ont des fréquences qui avoisinent les 3000 Hz.
- **Vitesse minimale requise** : Sachant que l'amplitude est inférieure à 0.1 mm et que la fréquence maximale à mesurer est 3000Hz, Il nous faut

V> 0.0001 * 3000= 0.3 m/s

- Les potentiomètres résistifs

Voir Annexes pour la comparaison des modèles.

Le meilleur modèle est apparemment le M40 de SFIM. Effectivement, c'est un potentiomètre à piste (donc bonne résolution), son étendue de mesure correspond exactement

aux besoins d'où une plus grande précision, le vitesse est correcte. En revanche, son prix est un petit peu élevé.

- Les capacitifs

Ce type de capteurs est, apparemment assez peu utilisé (au contraire des potentiomètres) ; nous avons eu beaucoup de mal à trouver des références pour notre type d'utilisation.

Nous manquons d'informations précises sur ces capteurs : les caractéristiques des références que nous possédons sont incomplètes. Nous ne pouvons donc conclure.

Voir Annexes pour la comparaison des modèles

- Les jauges

L'utilisation première des jauges est de mesurer des forces et des poids ; pas des déplacements. Nous n'avons trouvé nulle part des jauges classées dans les capteurs de déplacement. Néanmoins, il est possible de les utiliser pour l'emploi que nous comptons en faire, comme les rosettes.

d- les problèmes liés àla méthode

L'étude de cette méthode laisse apparaître comme grande faiblesse plusieurs sources d'incertitude :

- **lieu de frappe** : On a établi précédemment que le timbalier devrait taper sur un endroit fixe pour accorder la timbale. Cette zone est relativement exiguë. Par l'imprécision de la frappe, le facteur humain peut provoquer des incertitudes qu'il est difficile de quantifier.
- **Problème des interférences** : L'environnement sonore (l'orchestre) provoque lui aussi des vibrations sur la membrane, ce qui pourrait perturber la mesure de fréquence. De plus, comme vu plus haut, au point de mesure s'ajoutent les vibrations de tous les modes. La mesure du mode (11) est donc affectée d'une imprécision qu'il est difficile d'évaluer sans expérimentation.

Un traitement du signal efficace est indispensable. La question est de savoir comment le mettre en place et est-ce que cela est réellement possible compte tenu des nombreux facteurs d'incertitudes évoqués ci dessus.

2) Mesure indirecte de la fréquence via la tension

Cette méthode a pour idée de base le fait qu'il y a une relation directe entre la tension de la peau et la note entendue. Autrement dit, en trouvant une relation entre la tension et la fréquence de vibration du mode (11) (donc la note), notre problème se ramène à la mesure de la tension de la peau.

En nous plongeant dans la documentation spécialisée, nous avons trouvé une relation entre la fréquence de vibration de la membrane et la tension. Il s'agit d'un lien de proportionnalité entre la fréquence et la racine carrée de la tension. Entre en compte un coefficient constant pour une membrane donnée et des conditions données, prenant en compte le volume de la caisse, le diamètre de la timbale, l'humidité, la densité surfacique de la membrane…

Comment déterminer ce coefficient qui n'apparaît dans aucune documentation ?

Le plus simple est d'utiliser la première méthode exposée dans ce rapport pour déterminer cette constante : en effet, il suffit de régler correctement la timbale sur une note (une fréquence connue), puis de trouver un moyen pour lire la tension et, à partir de là, le coefficient est trouvé.

$$F_{(11)} = \alpha * T^{0.5} \text{ d'où } \alpha = F_{(11)} / T^{0.5}$$

Nos deux méthodes sont donc complémentaires ; la première, compliquée, demande beaucoup d'attention de la part du timbalier (zone de frappe précise)… La deuxième, ensuite, est plus simple, une fois le coefficient fixé. A chaque fois que le timbalier désirera changer l'accord de son instrument (en cours de morceau par exemple), il ne s'agira en effet plus que d'une simple lecture sur un écran, le musicien n'aura plus à agir (les incertitudes de calcul liées à l'homme seront réduites ; en outre, il ne fera pas le moindre bruit pendant que l'orchestre jouera). Cela va sans dire qu'il faudra être particulièrement soigneux sur la première étape, que le timbalier effectuera avant le concert. On peut, en effet, raisonnablement estimer que les conditions extérieures (comme l'humidité ambiante) influant

sur le coefficient entre la fréquence et la tension de la peau resteront constantes pendant la durée du concert.

Pour des soucis de coûts, on peut utiliser des méthodes classiques acoustiques pour fixer la constante α.

En résumé, il s'agit donc de trouver un moyen de mesurer la tension de la peau.

La première question qui se pose est de trouver l'endroit OU capter cette vibration.

Ensuite, nous verrons COMMENT capter ces fréquences : les différentes technologies .

Puis AVEC QUOI ; quel capteur utiliser avec quelles caractéristiques.

Enfin, les CONTRAINTES et les LIMITES de cette méthode.

a- Où ?

Il apparaît clairement que pour des soucis de précision, il faut effectuer cette mesure de tension sur la tige entre la pédale et les tirants, ou alors sur la peau.

En effet, en nous positionnant sur la tige, la tension mesurée résulte de l'effet produit par chacun des tirants sur la peau, et donc offre une vue d'ensemble de la tension imposée à la peau. Un mesure sur les tirants aurait posé un problème de précision : tous les tirants ne correspondent pas forcément à un même niveau de tension.

b- Comment ?

- Les jauges

La tension agit sur un corps sollicité (peau ou tige). L'étirement qui en résulte est traduit électriquement grâce à une ou plusieurs jauges collées sur le corps d'épreuve et montées dans un pont de Wheatstone.

Après calculs, la relation qui donne la variation de longueur en fonction de la variation de la résistance de la jauge est la suivante :

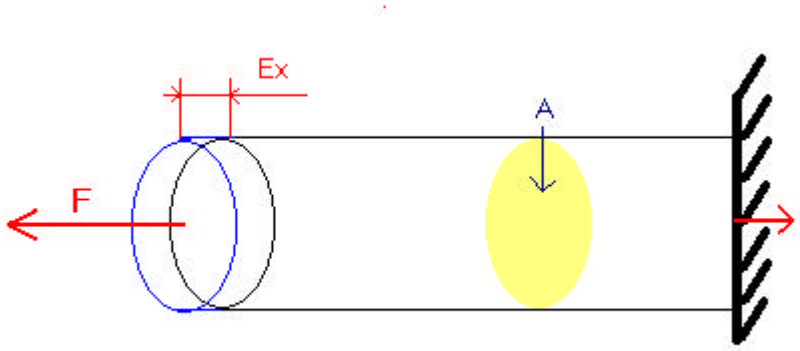
$$\frac{\Delta R}{R} = K(C,m)\frac{\Delta l}{l}$$

Le traitement apporté aux mesures effectuées sur la jauge nous donne donc $\Delta l/l$.

Pour obtenir la variation de tension qui en découle, on utilise la loi de Hook.

- Sur la tige de rayon 4mm, $\sigma = E.\ \Delta l/l = F/A$ $A=Pi*R^2=Pi * 4^2 = 50.26$ mm²

Les tiges sont en acier ; donc E = 200 GPa. On en déduit alors facilement F en fonction de $\Delta l/l$.



- Sur la peau de rayon 50cm, $A=Pi*R^2=Pi * 0.5^2 = 0.78$ m²

La peau est en Mylar ; donc E est voisin de 1GPa (polymère).

- La piezzorésistance

a) Le principe

Le principe de la piezzorésistance est de lier une variation de volume relatif d'un matériau à une variation relative de sa résistivité.

$$\Delta\rho/\rho = C^* \Delta V/V$$

avec ρ la résistivité, V le volume et C la constante de Bridgman.

Ainsi, si nous soumettons un tel type de capteur à une force, une tension, son volume relatif va changer, et nous pouvons déterminer la valeur de la force appliquée. Ce type de capteur semble donc convenir à notre problème pour mesurer la tension de la membrane.

b) Les caractéristiques métrologiques

La sensibilité du capteur dépend :

- de la valeur des coefficients piezzoélectriques du matériau,
- du type de déformation qu'il subit.

La linéarité et l'absence d'hystéresis impliquent que la déformation sous charge restent en deçà de la limite du domaine d'élasticité (limite supérieure de l'étendue de mesure).

La résolution des capteurs de force à quartz est excellente (quelques mN quelle que soit l'étendue de mesure).

La bande passante :

- Les mesures statiques sont délicates : il y a une limitation pour les fréquences basses.

- La limitation vers les hautes fréquences est généralement due à la résonance mécanique, à la fréquence f0.

La réponse en fréquence est celle d'un système du second ordre très faiblement amorti. Ceci implique que la fréquence f maximale du mesurande doit être à peu près égale à 0.2f0.

On a donc intérêt à prendre une valeur élevée de f0 pour la mesure d'efforts rapidement variables… Ce qui n'est pas tout à fait le cas dans notre sujet :f0 ne sera pas déterminant dans le choix de notre capteur piezzorésistif.

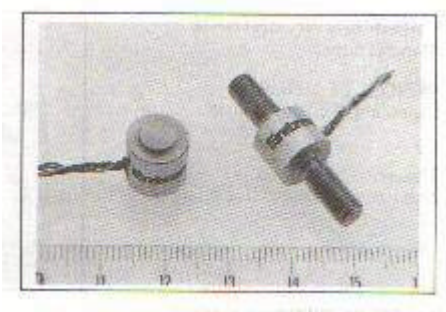


Figure 18 : Capteurs piezzorésistifs

c- matériel disponible

Pour toutes ces méthodes, les **exigences** générales sont les suivantes :

- **Le prix** : toujours inférieur à environ 1500F

- **l'étendue de mesure** : Le paramètre que l'on mesure et qui nous importe ici est la tension. De manière générale, afin de couvrir tous les types de timbales, nous aurons à mesurer des tensions comprises entre 1000 N/m et 6000 N/m.
- **la précision** : Après discussion avec un chercheur à l'IRCAM, on a estimé que une précision de 5N sur la tension a un impact sur la note indécelable par l'oreille humaine.

- les jauges

Des exigences spécifiques aux jauges sont à respecter :

- **taille** : Si la jauge est fixée sur la peau, elle doit être suffisamment petite et discrète pour ne pas perturber la mesure. Intuitivement (des mesures seraient nécessaires), une longueur maximale de 3 cm nous semble acceptable. Si elle est placée sur la tige, la longueur maximale monte à 20 cm.
- **Masse** : Si la jauge est fixée sur la peau, elle ne doit pas amortir les vibrations. On estime que une force de 0.5N (par rapport aux 5000N de la tension) est sans effet sur la mesure. Cela correspond à une masse de 50g. Aucune exigence si on la place sur la tige.

Voir annexes pour le matériel

En ce qui concerne la méthode consistant à coller la jauge sur la peau, différents modèles sont disponibles sur le marché. Cependant, la contrainte « taille » est rarement respectée. Ne pouvons nous pas nous imposer une limite plus grande ?

D'autre part, la masse de la jauge, paramètre important, est rarement indiquée.

Tout nous pousse finalement à rejeter cette méthode : les contraintes sont bien moins importantes pour mesurer la tension sur la tige. Ainsi, le capteur MEDIAMATE de Data Instruments nous paraît satisfaisant : prix exceptionnel (500 à 1000 F), bonne précision et bonne étendue de mesure.

- Les capteurs piezzo électriques

Des contraintes sont à respecter impérativement :

- Etant donné que nous placerons notre appareillage sur la tige, il faut bien s'assurer que le capteur piezzorésistif que nous choisirons peut travailler en traction, et pas seulement en compression.

- Pour le reste, en ce qui concerne les contraintes de dimensions, de masse, nous n'avons pas d'exigence particulière, à l'image de ce que nous souhaitions pour les jauges.

Voir annexes pour les modèles sélectionnés

Les informations données par les constructeurs, disponibles dans les catalogues (CETIM), sont bien souvent incomplètes: aucune indication concernant l'aptitude à travailler en traction, notamment.

Nous avons choisi le modèle ELH-15 de ENTRAN, car son prix est dans la fourchette que nous nous sommes fixée ; son encombrement est très réduit ; il offre de bonnes performances en terme de précision , et par dessus tout, il est explicitement conçu pour travailler en traction.

d- Contraintes et limites

L'étude des jauges disponibles sur le marché nous a montré que l'idée de placer une jauge à même la peau n'est pas réalisable, compte tenu de nos exigences.

Le choix se porte donc sur une mesure au niveau de la tige, soit avec une jauge, soit avec un capteur piezzorésistif. Pour ce qui est de départager ces deux méthodes, à performance égale (au niveau de la précision) l'argument du prix nous semble décisif. Ainsi nous optons pour la jauge.

Pour les jauges, étant donné que la tige est en acier, son module d'Young E est très élevé. Par conséquent, pour une contrainte donnée, le déplacement linéaire sera extrêmement faible. Les jauges sélectionnées doivent percevoir les élongations de la tige.

VI. NOTRE PROPOSITION

Propositions	Avantages	Inconvénients
Méthode 1 : Résistance	Abondance sur le marché Précision	Prix
Méthode 1 : Capacité	A priori, les prix ont l'air corrects	Manque d'informations, apparament ce type de capteur n'est pas très utilisé (d'après le catalogue du CETIM)
Méthode 1 : Jauge		Nous n'avons trouvé aucun modèle.
Méthode 2 : Jauge sur la peau	Aucun	Trop gros, trop lourd,… Impossible
Méthode 2 : Jauge sur la tige	Prix***	
Méthode 2 : piezzorésistivité	Répond à nos contraintes	Un peu cher

En définitive, nous avons exclu la première méthode à cause des nombreux facteurs qui viennent perturber la mesure, et du filtre qu'il est nécessaire de mettre au point. Cependant, il semble que le traitement du signal pourrait résoudre sans difficultés ce probléme…

Ainsi, nous optons pour la deuxième méthode, qui nécessite l'appoint d'un accordeur traditionnel en début de concert, afin de fixer la constante dépendant des conditions extérieures à la timbale. En ce qui concerne le choix de la technologie, seul le facteur prix s'est avéré déterminant pour départager la jauge sur la tige de la piezzorésistivité, qui ont des performances comparables et satisfaisantes.

Conclusion

Pour conclure, différentes technologies sont utilisables pour résoudre notre problème. Seules des contraintes de prix nous font pencher vers des jauges de contrainte.

Nous avons dû procéder à de quelques approximations de manière intuitive faute d'avoir pu effectuer des expériences (amplitude de vibration de la membrane, Tension de la peau…)

D'autres pistes sont éventuellement envisageables : on l'a vue, la tension de la peau est déterminée par la position de la pédale. Une mesure de cette position pourrait donc fournir (avec un étalonnage préalable) la tension imposée à la membrane, et donc donner la hauteur de la note produite. A priori, cette méthode nous semble imprécise car la note induite d'une position donnée varie en fonction des conditions climatiques, des conditions d'humidité de l'air, …

Bibliographie

Physique de la timbale

- The physics of musical instruments – Rossing et Fletcher – 1991
- Les instruments de l'orchestre – Pour la science – Belin
- Journal of acoustical society of America – november 1984
- Construire ses enceintes acoustiques
- Percussion Instruments in the Science of Sound – Rossing – 1982
- Contemporary Percussion – Smith – 1970
- www.premier.com
- www.labaguetterie.fr
- www.IRCAM.fr

Technologies des capteurs

- The pressure strain and force – Handbook – Omega Engineering
- Etalons et unités de mesure – BNM
- Les capteurs en instrumentation industrielle - Georges Asch
- Essais d'évaluation des capteurs de pression – CIAME
- Essais d'évaluation des capteurs de force et de pesage – CIAME
- www.CETIM.fr

Différents types de capteurs

- Capteurs industriels – Mécanique et mesure – CETIM

Annexes

- ***Annexe 1*** : Capteurs « potentiométres » ……. 39
- ***Annexe 2*** : Capteurs « capacitifs » …….. 40
- ***Annexe 3*** : Capteurs « piezzorésistances» …….. 41
- ***Annexe 4*** : Capteurs « jauges » …… 42