

Amelycor

(Association pour la mémoire du Lycée et du Collège de Rennes)

Atelier scientifique « nos instruments anciens »

du Lycée Emile Zola

B. Wolff

Cahier n°2 :

*"Ça vibre
et ça ~~raisonne~~ résonne
au Lycée Zola"*

*Exposé et expériences d'acoustique musicale
à l'aide d'instruments de nos collections de
sciences physiques*

A l'origine de ce cahier :

Une visite de nos collections par M. Auffret van der Kemp, directeur adjoint de l'Espace des Sciences (Centre de culture scientifique technique et industrielle, centre associé au Palais de la découverte) a été le déclencheur : en effet l'Espace des Sciences préparait alors l'exposition "Planète sons" pour les premiers mois de 1999 - exposition qui a présenté à un très nombreux public tous les aspects du phénomène sonore. L'Espace des Sciences nous invitait (Amelycor et Atelier scientifique) à proposer à cette occasion des animations sur le même thème utilisant les instruments de nos collections.

Nous avons donc travaillé avec les élèves de l'atelier (une douzaine d'élèves de 1^{ère} scientifique) à étudier ces instruments, réaliser des expériences et faire aussi un peu d'acoustique "théorique".

Une première démonstration de quelques instruments d'acoustique fut présentée par les élèves, à l'invitation de l'Espace des sciences (au centre Colombia) lors de l'inauguration officielle de l'exposition le 28 janvier.

Puis une série d'animations sous le titre "au Lycée Emile Zola, ça vibre et ça résonne" fut proposée, fin mars, au lycée: un "jeudi d'Amelycor" (exposé : B. Wolff, professeur au lycée), puis des "portes ouvertes" un samedi après-midi. Ces dernières commençaient par une conférence de Rozenn Nicol, ancienne élève du lycée, sur la "3^{ème} dimension" sonore¹ et se poursuivaient par la visite des salles où les élèves réalisaient et commentaient eux-mêmes les expériences (qu'ils avaient déjà contribué à monter et présenter lors de l'exposé du jeudi). Cette brochure fait la synthèse de l'exposé du jeudi et de tout le travail effectué par l'atelier.

Le phénomène sonore est un des sujets majeurs des actuels programmes de 2de : on y privilégie sa production ou sa reproduction par des moyens modernes (synthétiseur, baladeurs à cassettes ou à CD...). Quant à l'étude de sa nature et de ses propriétés, c'est l'ordinateur qui tient la vedette. Moyennant un microphone et un logiciel approprié, il est devenu facile d'analyser en quelques secondes un son musical : sa fréquence, les proportions des harmoniques responsables du "timbre", etc.

Sur le plan pédagogique, ce souci de valoriser l'outil moderne n'a pas que des avantages. Ainsi on passe beaucoup de temps à "décrire" les sons et beaucoup moins à comprendre comment ils sont engendrés par les "cordes vibrantes" d'un violon ou d'un piano ou les "tuyaux sonores" des orgues, flûtes ou clarinettes et comment cela détermine leurs caractéristiques.

Dans le travail présenté ici, nous n'avons utilisé au contraire que des instruments figurant dans les vieux traités d'il y a un siècle ou alors des dispositifs construits depuis, mais qu'on aurait pu mettre en œuvre à la même époque. Il prend place ainsi dans le cycle d'exposés, conférences et visites organisés depuis 1996 par l'AMELYCOR pour faire connaître le patrimoine d'instruments scientifiques anciens² du lycée Emile Zola et les autres aspects de son patrimoine historique. Ces activités préfigurent les animations publiques qui pourront se tenir dans le futur "espace patrimoine" dont la réalisation accompagnera l'actuelle rénovation de la cité scolaire.

Références bibliographiques: Nous avons utilisé les manuels anciens tels que Ganot : traité élémentaire de physique 10^{ème} édition (vers 1880), Drion et Fernet (édition 1869 et 93), Le Noir (programme 1880). Pour la compréhension théorique des notions de base sur les ondes sonores : livres de 1^{ère} S et terminale C des anciens programmes (1982-83). Au sujet des instruments de musique une excellente référence (certains articles ne sont pas très faciles pour des élèves de 1^{ère} sans préparation particulière) : **Les instruments de l'orchestre** (collection "pour la science", diffusion Belin)

Les élèves de l'atelier ne sont pas tous nommés dans le texte de l'exposé³. Toute la sympathique et dynamique équipe y a pourtant contribué, qu'il s'agisse de la mise au point des expériences, de la réalisation des photos⁴, de la discussion et de la relecture critique.

¹ Avec ce sujet, on sautait de l'acoustique du siècle dernier aux développements les plus récents!

² Ce n'est pas dans le domaine de l'acoustique que nos collections sont les plus riches ! Un catalogue de ces collections pourra bientôt être consulté sur Internet.

³ Où l'on a tenté de conserver la forme orale de celui du "jeudi d'Amelycor" : tous n'ont pu être présents comme "chargés d'expérience" à cette date.

⁴ Quelques unes des photos sont dues à M. G. Chapelan (illustrations du catalogue). Nous lui devons aussi d'avoir pu disposer à temps de quelques très beaux tuyaux d'orgue provenant de l'IUFM (ancienne école normale) que nous remercions également.

Sommaire :

- 1. L'exposé : "ça vibre et ça résonne à Zola"**
- 2. Appendice : généralités sur les ondes**
- 3. Quelques définitions et formules**
- 4. Planches photographiques**

L'exposé : "Ça vibre et ça ~~raisonne~~ résonne au Lycée Zola"

A l'origine d'un son, il y a toujours "quelque chose" qui vibre :

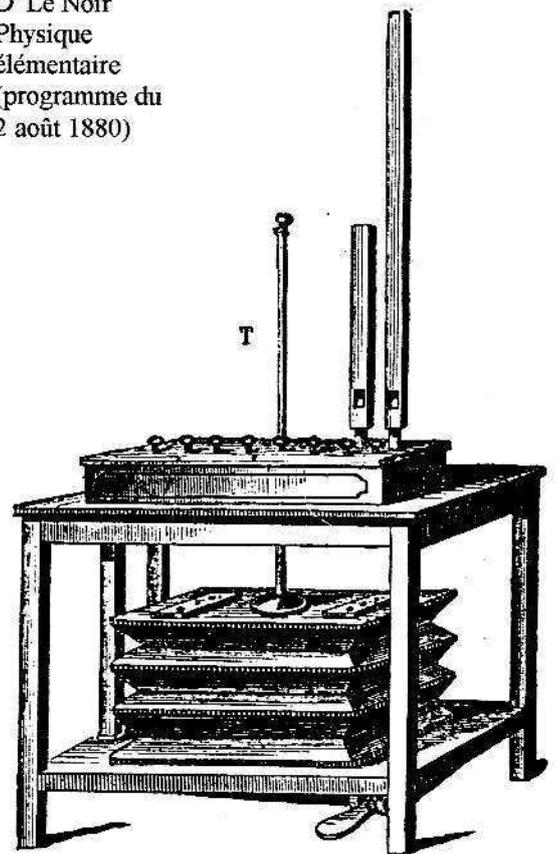
- Voyez par exemple cette cloche (photo² n°1) : de votre place vous ne pouvez voir les vibrations du métal, mais le très léger pendule dont elles élancent la boule les met en évidence...
- Voyez encore la corde de ce "sonomètre" (photo 2), dont la vibration rapide dessine comme un fuseau. Fuseau particulièrement visible aussi lorsque je joue une corde grave de ma harpe...
- Enfin, dans ces tuyaux d'orgue³, c'est la colonne d'air intérieure qui vibre. Mais il est difficile de voir l'air vibrer, sans recourir à des moyens modernes, d'ailleurs bien connus des élèves de 2^{de} dans le cadre des programmes actuels (la membrane d'un microphone plongé dans le tuyau vibre, ce qui est source d'une vibration électrique que l'on observe sur un oscillographe). Les vieux manuels proposent cependant une expérience délicate, avec un tuyau à paroi de verre (fig. 2 et photo 4).

Expérience:

Morgane et Clélia font descendre lentement le petit plateau dans le tuyau qu'elles font "parler" sur sa note la plus grave, dite "fondamentale". On observe alors que le sable posé sur le plateau tressaute au voisinage des extrémités du tuyau, et reste au contraire immobile dans la région centrale. On en conclut que les extrémités sont

Fig.1
Buffet d'orgue et soufflerie

D^r Le Noir
Physique
élémentaire
(programme du
2 août 1880)



¹ Ce n'est pas dans le domaine de l'acoustique que nos collections sont les plus riches ! Un catalogue de ces collections pourra bientôt être consulté sur Internet.

² Pour toutes les photos, voir les planches couleur regroupées en dernière partie de cette brochure.

³ La photo n°3 montre les "ruines" du petit buffet d'orgue et de sa soufflerie que possédait au siècle dernier notre laboratoire, et une partie des tuyaux que l'on pouvait faire "parler" en actionnant de petites touches commandant l'entrée d'air. La figure 1 est l'illustration qu'en donnent tous les manuels des années 1880.

des "ventres de mouvement" tandis que la région centrale est un "nœud de mouvement"⁴.

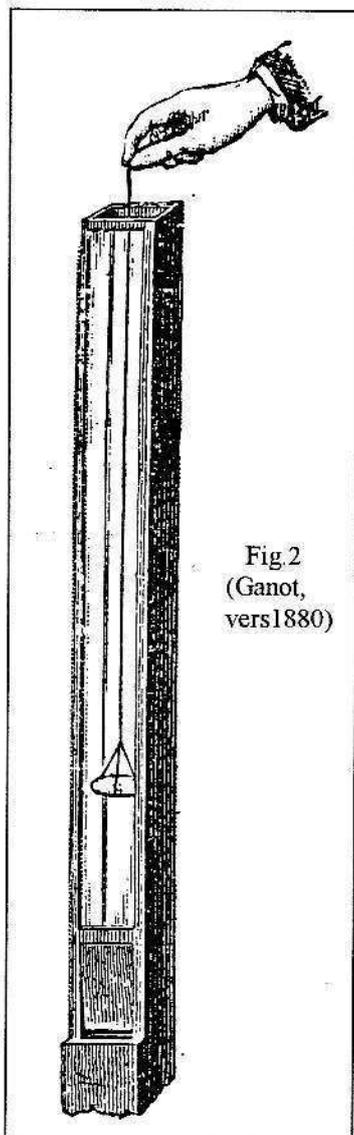


Fig. 2
(Ganot,
vers 1880)

Une autre expérience (fig. 3 et photo 5) permettait de détecter les variations de pression de l'air en certains points du tuyau au moyen de "l'appareil à flammes manométriques" de Kœnig⁵. C'est alors au contraire la flamme centrale qui est fortement perturbée, et celles proches des extrémités qui brûlent normalement, ce qui met en évidence le fait qu'un "ventre" de mouvement coïncide avec un "nœud" de pression (lieu où les variations de pression sont pratiquement nulles) tandis qu'un "nœud" de mouvement correspond à un "ventre" de pression (variations de pression maximales).

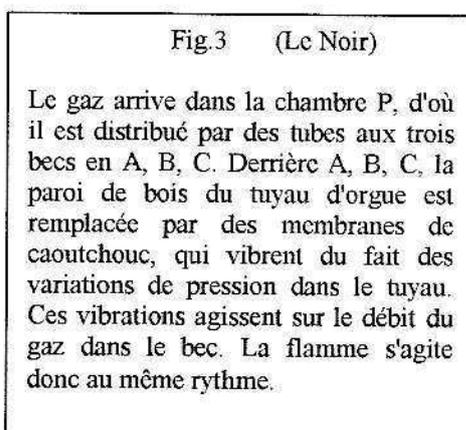


Fig. 3 (Lc Noir)

Le gaz arrive dans la chambre P, d'où il est distribué par des tubes aux trois becs en A, B, C. Derrière A, B, C, la paroi de bois du tuyau d'orgue est remplacée par des membranes de caoutchouc, qui vibrent du fait des variations de pression dans le tuyau. Ces vibrations agissent sur le débit du gaz dans le bec. La flamme s'agite donc au même rythme.

Propagation du son : un milieu élastique est nécessaire. L'onde sonore.

Pour que le son émis par les sources sonores que nous venons d'étudier soit perçu par vos oreilles un milieu de propagation est indispensable : voyez et entendez cette jolie clochette (photo n°6), qu'agite Marie. Maintenant elle fait le vide à l'aide d'une pompe dans le ballon où est enfermée cette clochette, puis l'agite à nouveau. Vous n'entendez presque plus la clochette: le son ne se propage pas dans le vide !

Par contre tous les milieux élastiques⁶ propagent bien le son:

l'air, à environ 340 m/s (dans les conditions habituelles de température)

l'eau (à ≈ 1500 m/s), le bois (de ≈ 3500 à ≈ 5500 m/s), les métaux (de ≈ 1000 à ≈ 6000 m/s).

Mais à quoi ressemble cette propagation ? Une fois de plus il est difficile de voir ce qui se propage entre la clochette et votre oreille. Vous avez déjà vu se propager des ondes à la surface de l'eau : comme la perturbation (crête ou creux) est de direction perpendiculaire (verticale) à celle de propagation (horizontale) on parle d'onde transversale. De même le long de cette corde de caoutchouc, ou de ce ressort, je fais se propager un signal transversal (expérience). Mais l'onde sonore est longitudinale : ce qui se passe lorsque je

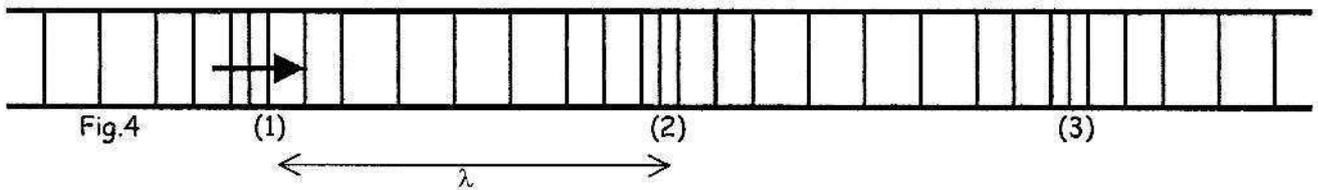
⁴ "Ventre de mouvement" : lieu de mouvement maximal, "nœud de mouvement" : lieu de mouvement nul. Ces termes sont employés par analogie avec la description des cordes vibrantes, où le "ventre" correspond à la région renflée du fuseau tandis que les "nœuds" correspondent aux points immobiles (voir en 2^{ème} partie l'appendice "généralités sur les ondes")

⁵ Le tuyau ainsi équipé était absent de nos collections. Celui présenté les 25 et 27 mars provenait de la collection de l'ancienne école normale mais nous n'en avons pas disposé à temps pour l'alimenter en gaz et monter l'expérience.

⁶ Un matériau est dit élastique s'il reprend sa forme et son volume quand la force qui l'a déformé cesse d'agir (les déformations dont il est question peuvent être infimes, lorsqu'il s'agit par exemple des étirements et compressions d'une tige d'acier ou des déformations provoquées dans l'eau par des variations de pression....)

libère après les avoir comprimées les 2 ou 3 premières spires de ce long ressort (*expérience*) en donne une meilleure idée. La propagation du son est l'analogie d'une *onde progressive longitudinale* le long d'un ressort⁷.

Aux spires resserrées (schématisées ci-dessous en (1), (2), (3)) correspondent des "tranches d'air" plus comprimées que la moyenne, aux spires écartées, des tranches plus dilatées. La propagation de ces surpressions et dépressions (par rapport à la pression atmosphérique moyenne) constitue l'onde progressive.



Comme dans le cas du ressort c'est la *perturbation* qui se propage et non la matière ; de même qu'aucune spire ne court d'un bout à l'autre du ressort, le son n'est pas un vent soufflant à 340 m/s!

On appelle "*longueur d'onde*" λ , pour les ondes à la surface de l'eau, la distance entre deux "crêtes" successives. Pour l'onde sonore, c'est la distance entre, par exemple, deux maxima de pression.

Mais revenons à la source sonore :

De quoi dépend la note émise par une corde ?

- Voyons d'abord le rôle de la longueur

Expérience : après vous avoir fait entendre la note émise par le sonomètre pour une longueur (*cd*) de corde de 1 m, je réduis grâce au chevalet mobile (*m*) cette longueur successivement à la moitié, au tiers, au quart, etc. Quelles notes entendez-vous ?

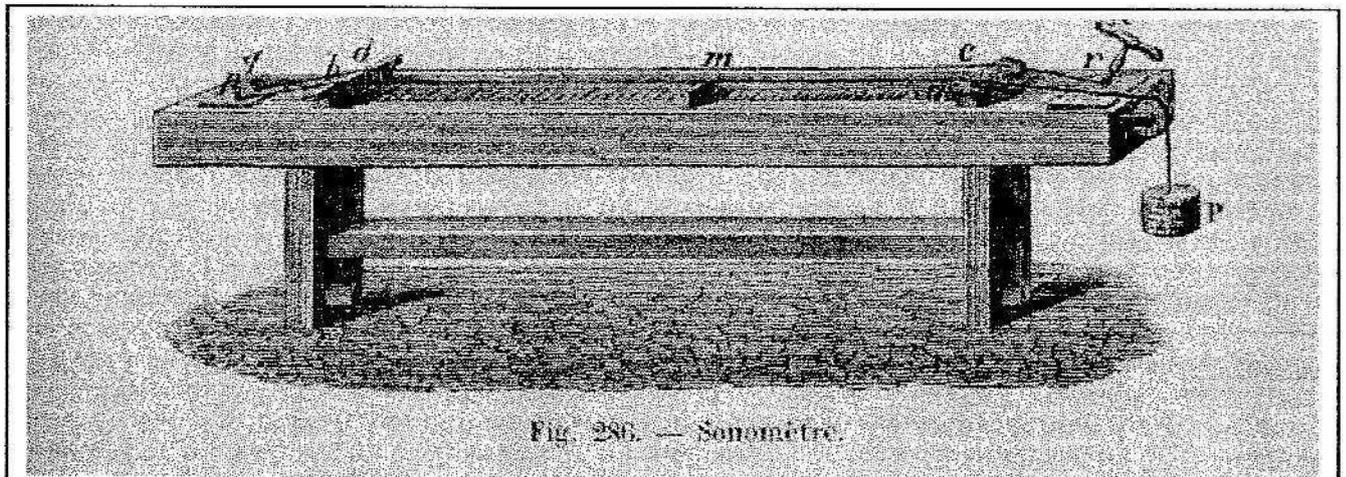


Fig. 5 (Drion et Fernet. Ed. 1893)

Le document "longueurs de corde et intervalles musicaux" présenté ci-contre (page 5) résume les réponses.

On attribue en général à Pythagore⁸ la découverte de cette correspondance entre *rapports numériques* simples et *intervalles* musicaux harmonieux. Donner à la connaissance de la nature un fondement numérique était le projet des Pythagoriciens, bien avant que leur disciple Galilée n'affirme que "le grand livre de la nature est écrit en langage mathématique". Si la physique moderne est née de cette conviction, alors c'est avec la musique qu'elle a commencé! Au point qu'en recherchant le Nombre dans l'univers entier, les Pythagoriciens croyaient entendre "la musique des sphères".

(suite page 6)

⁷ Signaux transversaux, longitudinaux, ondes progressives : voir §1 et 2 de l'appendice.

⁸ Voir la 4^{ème} partie : document "quelques dates"

Longueurs de cordes et intervalles musicaux

Si l'on divise la longueur L d'une corde donnant initialement la note "do" par les nombres entiers successifs on obtient :

L		$L/2$		$L/3$		$L/4$	$L/5$	$L/6$	$L/7$	$L/8$
Do		Do		Sol		Do	Mi	Sol	Si b	Do

\leftarrow ----- \rightarrow \leftarrow ----- \rightarrow
 octave quinte quarte tierce majeure tierce mineure seconde majeure

 \leftarrow ----- \rightarrow \leftarrow ----- \rightarrow
 octave octave

 \leftarrow ----- \rightarrow
 octave

Si l'on utilise des fractions simples comprises entre 1 et $\frac{1}{2}$:

L	$8L/9$	$4L/5$	$3L/4$	$2L/3$	$3L/5$	$4L/7$	$L/2$
Do	Ré	Mi	Fa	Sol	La	Si b	Do

(Le si bécarré correspond à $8L/15$)

On vérifiera facilement qu'à des facteurs 2 ou 4 près (et donc à 1 ou 2 octaves près) il y a correspondance entre des notes de même nom engendrées dans les deux systèmes. En utilisant si bécarré (et non si bémol) les notes ci-dessus sont celles de la "gamme de do".

Les notes définies par ces rapports simples sont celles de la **gamme dite "naturelle" de Zarlino** (compositeur italien du 16^{ème} siècle), assez proche de la gamme pythagoricienne qui avait régné en Grèce (dont les notes se déduisaient les unes des autres par quintes exactes successives).

Mais on peut vérifier que les "intervalles" (définis par les rapports entre longueurs de cordes, ou ce qui revient au même par les rapports entre fréquences des sons émis⁹) ne sont pas rigoureusement égaux pour do-ré ou fa-sol ($9/8$) d'une part et ré-mi ou sol-la ($10/9$) d'autre part.

Ces inégalités posaient des problèmes aux musiciens : par exemple le mi de la "gamme de ré", construite sur le modèle ci-dessus mais avec ré pour point de départ, était un peu différent de celui de la gamme de do. C'est pour résoudre ce genre de problèmes que fut définie à la fin du 17^{ème} siècle la **gamme dite "tempérée"** (cf. le célèbre "clavecin bien tempéré" de J.S. Bach) où l'octave est divisée en 12 demi-tons équidistants définis par des rapports de fréquence égaux à la "racine 12^{ème} de 2". Alors l'intervalle de do à ré, comme celui de ré à mi, correspond à la "racine 6^{ème} de 2" soit environ 1,12.

⁹ Il est important de noter que notre oreille perçoit comme des différences ("intervalles") égales ce qui correspond physiquement à des rapports égaux.

Il faut ajouter qu'en *divisant la longueur* par 2, 3, 4,... je divisais la *période* de vibration par 2, 3, ou 4 et *multipliais donc la fréquence* par ces mêmes nombres... Ainsi par exemple ce que vous *percevez* comme une "différence" de "hauteur" d'une octave correspond d'un point de vue physique à un *rapport* de fréquences de 2, etc.

L'explication de la relation entre longueur de corde et fréquence de la vibration est donnée dans les 2^{ème} et 3^{ème} parties : lorsqu'on relâche la corde, ses oscillations conduisent à l'établissement d'une "onde stationnaire" et si elle vibre "en un fuseau" sa longueur est la moitié de la longueur d'onde (p. II-4) d'où la formule (III-4)

Cette relation n'était bien sûr pas connue de Pythagore. Les moyens actuels (microphone + oscillographe) permettent d'en convaincre très facilement n'importe quel lycéen, mais il a fallu énormément d'ingéniosité, dans la 1^{ère} moitié du 17^{ème} siècle, à Mersenne (1588-1658) et à ses contemporains pour avoir la première estimation des fréquences perçues par l'oreille humaine.¹⁰ Même la note la plus grave que je vous ai jouée sur le sonomètre correspondait à une centaine de hertz (c'est-à-dire une centaine d'aller-retour par seconde, ce que vous ne pourriez guère compter à l'œil nu !)

- Voyons maintenant le rôle de la **tension** de la corde

Tout le monde sait bien qu'en tendant davantage une corde guitaristes, harpistes ou violonistes lui font rendre un son plus aigu. Je le montre rapidement sur la harpe (photo 7), mais le sonomètre va nous permettre une *expérience* plus quantitative : écoutez la note jouée par *Jehane* lorsqu'un poids de 2 kg environ tend la corde, puis lorsqu'on passe à 8 kg¹¹ (photo 8).

Vous constatez que l'intervalle entre les deux notes est voisin de l'octave. Il faut donc quadrupler la tension pour doubler la fréquence.

- Enfin le **matériau** et le **diamètre** de la corde jouent également un rôle

Par exemple en doublant le diamètre de la 2^{ème} corde du sonomètre, à égalité de longueur et de tension avec la 1^{ère}, on obtiendrait un son d'une octave plus grave.

En résumé, la fréquence est

- inversement proportionnelle à la longueur
- proportionnelle à la racine carrée de la tension
- inversement proportionnelle à la racine carrée de la masse par unité de longueur.

Ceci se trouve justifié et condensé en une seule formule en 3^{ème} partie (III-5)

Et de quoi dépend la note émise par un tuyau sonore ?

Expérience : je joue plusieurs tuyaux d'orgue, du type "à embouchure de flûte" et à extrémité ouverte. Si l'on mesure la distance entre la bouche et l'extrémité, on trouve, comme pour les cordes, que diviser cette distance par deux conduit à "monter" d'une octave, par 2/3 d'une quinte, etc.

Mais avec une flûte (flûte de Pan mis à part) on n'a pas un tuyau différent par note ! En fait, en ouvrant des trous percés le long du cylindre, le flûtiste raccourcit la colonne d'air en vibration : l'embouchure est une des extrémités de la colonne utile, l'autre extrémité de cette colonne correspond au 1^{er} trou (suffisamment gros) ouvert à partir de l'embouchure. Avec la flûte de Claire (photo 9) nous vérifions là aussi les rapports de longueur !

Interprétation : précédemment nous avons décrit des expériences (p. 2 et 3) montrant qu'un tuyau d'orgue "à embouchure de flûte" et à extrémité ouverte vibre normalement (quand il émet la note "fondamentale") "en un fuseau". Il en est de même pour la colonne d'air de la flûte traversière. La situation est donc analogue à celle de la corde que nous venons d'étudier et conduit à la même relation : la fréquence du son est inversement proportionnelle à la longueur utile L.

¹⁰ Dans les manuels du siècle dernier sont décrits des appareils ingénieux, que nous n'avons pas retrouvés à Zola, permettant de connaître la fréquence responsable d'une note musicale donnée

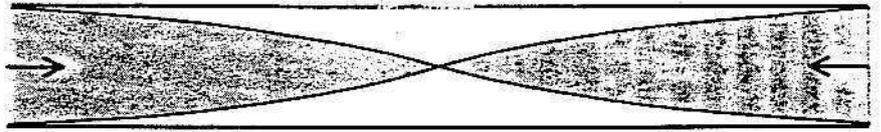
¹¹ ces valeurs ne sont pas élevées par rapport à celles rencontrées en pratique : près d'une dizaine de kg par corde de violon, un total de l'ordre de la tonne pour une harpe classique, tandis que le cadre d'un piano à queue moderne supporte 28 tonnes!

Mais que veut-on dire par "fuseau" dans le cas de la vibration d'une colonne d'air ?

J'ai donné (p.4, fig.4) l'image d'une onde sonore *progressive* dans l'air. Dans un milieu de propagation limité aux deux extrémités comme la colonne d'air d'un tuyau sonore, c'est une onde *stationnaire* longitudinale qui s'établit, dont un analogue le long d'un ressort est donné par la fig.7 de l'appendice.

Ci-contre les flèches symbolisent le mouvement des "tranches d'air" des extrémités ("ventres de mouvement") à un instant $t = 0$. Un peu plus tard ($t = T/2$), ce mouvement serait inversé, et ainsi de suite. Au milieu, pas de mouvement ("nœud"). La largeur du motif en gris indique l'amplitude du mouvement en différentes parties du tuyau et dessine ainsi l'analogie des "fuseaux" d'une onde transversale. D'où l'extension de ce terme aux ondes longitudinales.

Fig.6



Si l'on s'intéresse maintenant à la pression, elle est invariable aux extrémités (nœuds) car elle est imposée par la pression atmosphérique extérieure. Il est aisé de comprendre pourquoi le milieu est au contraire un ventre de pression : la figure montre qu'à $t = 0$ les mouvements "tassent" l'air vers le centre, tandis qu'à $T/2$, la zone centrale sera dilatée. Cette zone subit donc des variations de pression d'amplitude maximale et de période T .

Mais la source sonore peut vibrer de façon plus complexe...

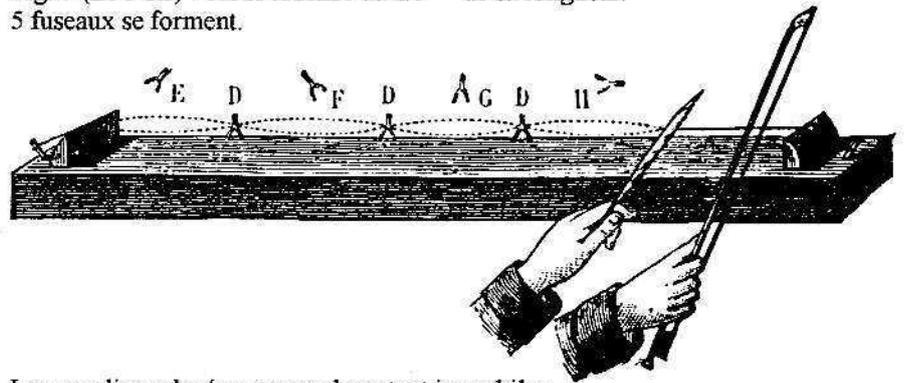
Je joue sur une corde de harpe ce qu'on appelle des "harmoniques" : d'abord l'octave, puis la quinte au-dessus, etc. De même je fais "octavier" un tuyau d'orgue. Claire fait de même sur sa flûte (elle arrive à monter jusqu'au 7^{ème} harmonique : tous les trous restant fermés - donc à longueur de colonne d'air constante - elle émet pourtant, après le do "fondamental", les harmoniques successifs de plus en plus aigus do, sol, do, mi, sol, si bémol ...).

Que s'est-il passé ? Nous avons "obligé" la corde (ou la colonne d'air) à vibrer en 2, 3, 4, ... fuseaux. Ainsi une corde de 1m, si elle vibre en 2 fuseaux de 50 cm, va donner la note que donnait tout à l'heure la corde de 50 cm vibrant "normalement".

Jean-Nicolas réalise des harmoniques sur le sonomètre (fig.7) : tout en excitant la corde avec l'archet, il la touche légèrement au demi ou au tiers par exemple. La corde donne alors un son bien clair (un contact en un point quelconque l'empêcherait au contraire de vibrer). Les petits cavaliers de papier que Jehane a placés sur la corde¹² permettent de montrer qu'en contraignant un nœud à se former au point touché, on fait se former 2,3,4,... fuseaux de longueur égale.

L'expérience analogue avec le tuyau à paroi de verre ou le tuyau à flammes manométriques est possible : en augmentant le souffle exciteur, on obtient une note une octave plus aiguë que la "fondamentale", puis une quinte encore au-dessus... On met alors en évidence des systèmes de nœuds et ventres de mouvement présentés ci-après (fig. 8a)¹³

Fig. 7 (Le Noir) : corde touchée au 1/5^{ème} de sa longueur. 5 fuseaux se forment.



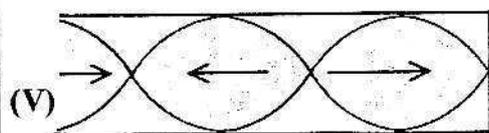
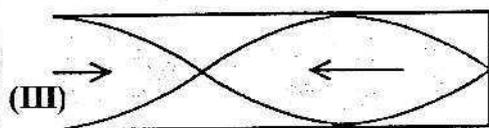
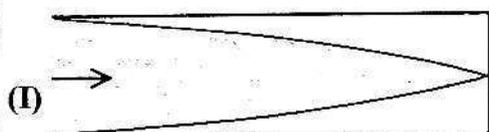
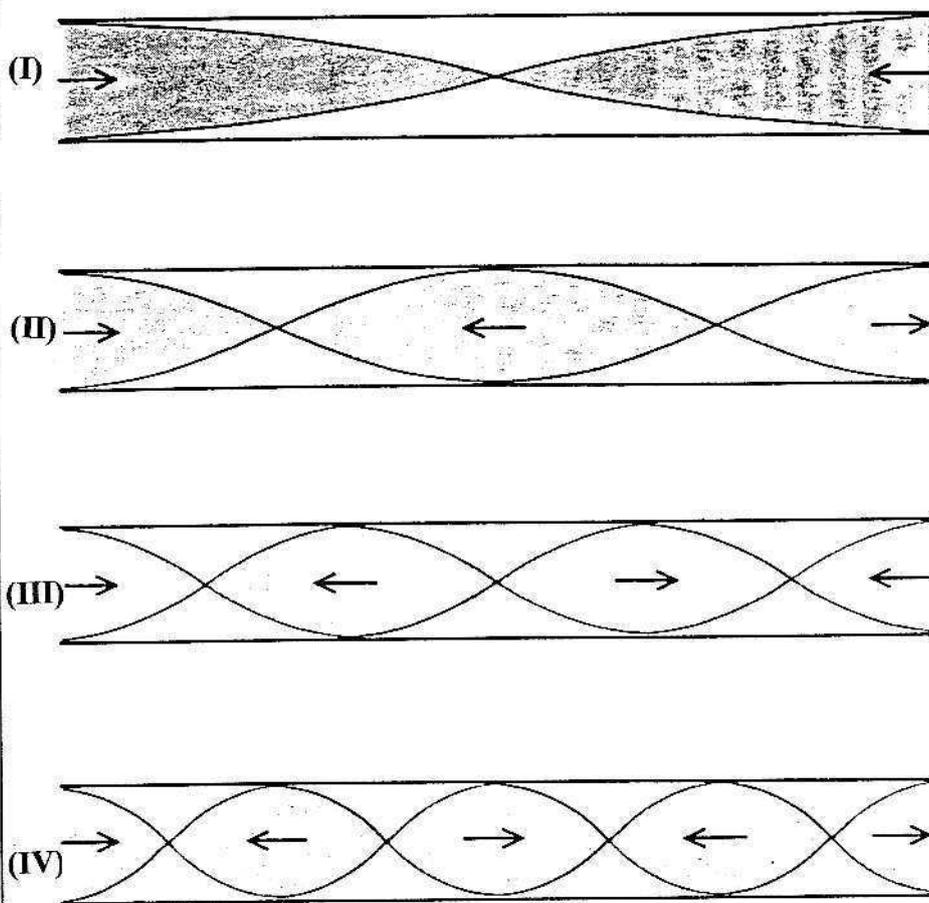
Les cavaliers placés aux nœuds restent immobiles, Tandis que les autres s'agitent ou sont expulsés.

¹² Cette utilisation de cavaliers de papier semble avoir été imaginée par Sauveur vers 1700.

¹³ Si l'on considère les nœuds et ventres de *pression* on retrouve la disposition obtenue pour les cordes: nœuds aux extrémités.

Fig. 8 (extraite de "les instruments de l'orchestre", bibliothèque pour la science, Belin)

a. 4 modes de vibration d'un tuyau ouvert à embouchure de flûte. Si f_1 est la fréquence du fondamental (I), celle f_2 de l'harmonique (II) est $2 f_1$, etc.



b. Modes de vibration possibles pour un tuyau fermé à une extrémité.

On comprend ainsi que le son fondamental (I) soit le même que pour le tuyau ouvert de longueur double, puisque le $\frac{1}{2}$ fuseau ($\lambda/4$) a même longueur qu'en (a. I)

On comprend de même que le premier harmonique possible soit (III) et corresponde à une longueur d'onde 3 fois plus petite et donc à la fréquence $f_3 = 3 f_1$, que le second harmonique (V) soit $f_5 = 5 f_1$, etc.

Le "timbre" d'un son musical.

En réalité une corde ou un tuyau sonore qui vibrent spontanément ne vibrent *pas* en un fuseau, ni en 2 ou 3, mais d'une façon complexe qui est la *superposition* de modes de vibration en un *et* plusieurs fuseaux.

La fig.9 montre ce que pourraient être les aspects réels successifs d'une corde pendant une demi période de la fréquence fondamentale. On y devine la superposition de vibrations de fréquences double et triple en 2 et 3 fuseaux.

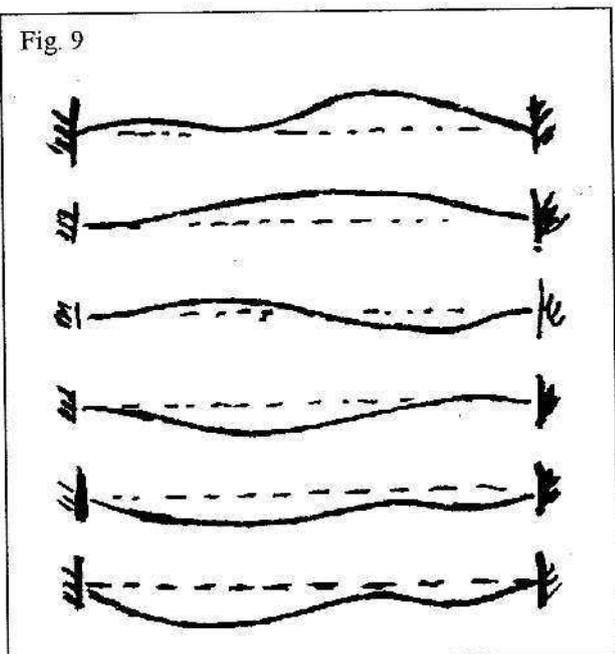
C'est la vibration correspondant à *un* fuseau qui détermine la "*hauteur*" de la note, mais ce qui fait le *timbre* bien particulier de la note chantée, ou jouée sur tel ou tel instrument, par tel ou tel interprète, ce sont les proportions des divers harmoniques superposés au "fondamental". (fig.10). Le toucher, ou le souffle, peuvent influencer considérablement sur ces proportions.

Il est cependant simpliste d'affirmer que cela suffit à faire la "personnalité" d'un son musical : on ne rend compte ainsi que d'un "moment" de ce son : celui où il est "tenu" à intensité donnée, mais les musiciens et les facteurs d'instruments savent à quel point *l'attaque* et le mode *d'extinction* du son jouent un rôle essentiel.

Comprendre aussi *pourquoi* s'établit une superposition particulière du "fondamental" et des "partiels", et *comment* la construction de l'instrument, le jeu de l'interprète y contribuent, comprendre aussi que les "partiels" de nombreux instruments ne sont pas les "harmoniques" exacts (fréquences rigoureusement

multiples) du fondamental dépasse le cadre de cet exposé. Mais le livre "les instruments de l'orchestre" (cité en 2^{ème} de couverture) apporte de riches indications à ce sujet.

Fig. 9



Légendes de la fig. 10 :

A. Oscillogrammes représentant la pression acoustique en fonction du temps.

1. Son "sinusoidal" émis par un diapason : seule la fréquence fondamentale est présente.
2. Son émis par un violon jouant la même note que le diapason (la période T est la même). Mais au fondamental sinusoïdal de fréquence $f = 1/T$ se superposent des "partiels" harmoniques du fondamental, de fréquences plus élevées.
3. Hautbois.
4. Cor.

(Source : "les instruments de l'orchestre", déjà cité)

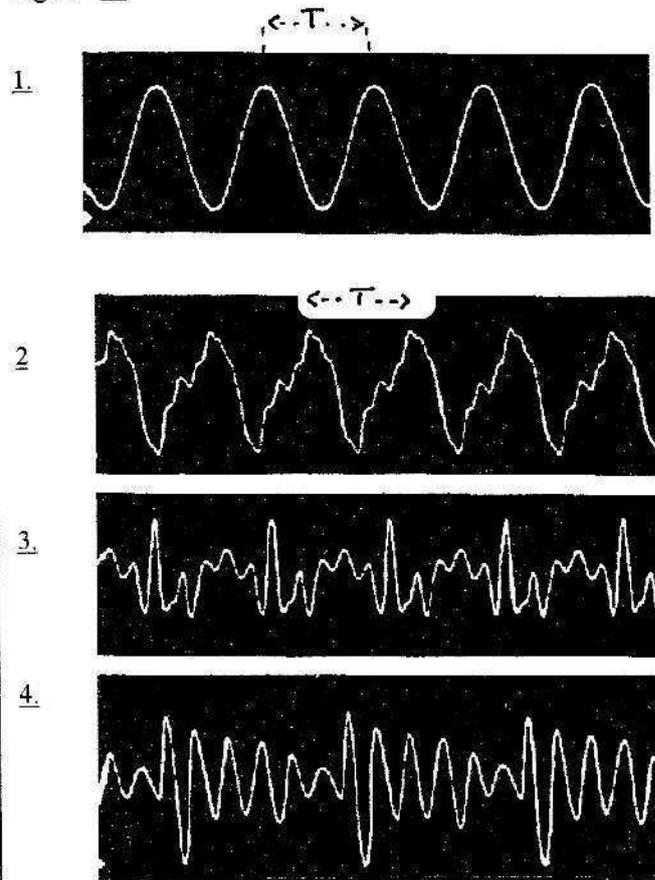
B. Actuellement des logiciels permettent d'analyser très rapidement des oscillogrammes analogues à ceux présentés en A. : on obtient le "spectre des partiels" d'un son musical, c'est-à-dire l'intensité relative de chaque composante (dite "partiel").

En abscisse la fréquence de chaque partiel (f_1 est celle du "fondamental", $f_2 = 2 f_1$, $f_3 = 3 f_1$, etc. celles des partiels harmoniques).

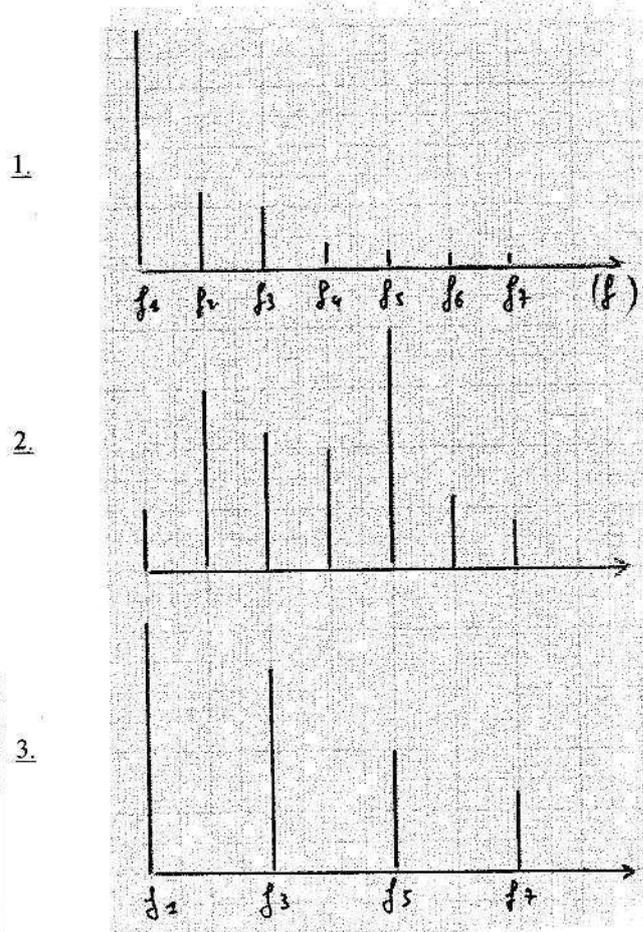
En ordonnée l'intensité relative.

1. Flûte
2. Violon
3. Clarinette.

Fig.10 A.



B.



Le cas des tuyaux à extrémité fermée; la clarinette et le hautbois.

Expérience: voyez ce tuyau un peu particulier (photos n°10c et 11, fig.11). Une coulisse mi-partie pleine, mi-partie évidée, permet, quand la partie évidée est enfoncée dans le tuyau, de le rendre analogue au tuyau "normal" joué précédemment. Je tire maintenant la coulisse de façon à ce qu'elle ferme le tuyau à mi-longueur. La colonne d'air vibrante est donc deux fois plus courte. Le son est-il une octave plus aiguë ? Non ! Vous entendez presque la même note!

L'explication, illustrée déjà fig.8b., est la suivante : l'obstacle qui ferme le tuyau est nécessairement un nœud de mouvement, aussi le tuyau vibre-t-il en un *demi-fuseau*. Ainsi un tuyau à embouchure de flûte *fermé* donne-t-il la même note que le tuyau *ouvert* de longueur double.

Le hautbois et la clarinette sont des instruments dits à "anche". Certains jeux d'orgue sont aussi "à anche" et nous disposons de quelques tuyaux de ce type (photo 12 et fig.12). Contrairement à l'embouchure de flûte où se forme un ventre

Fig.11

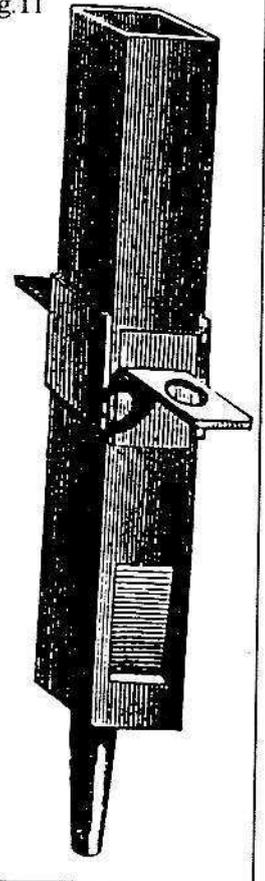
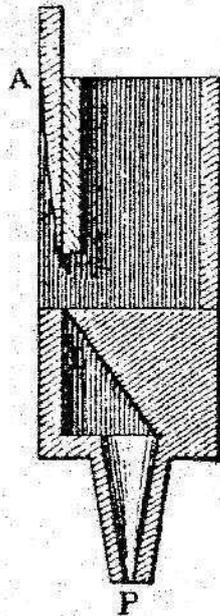
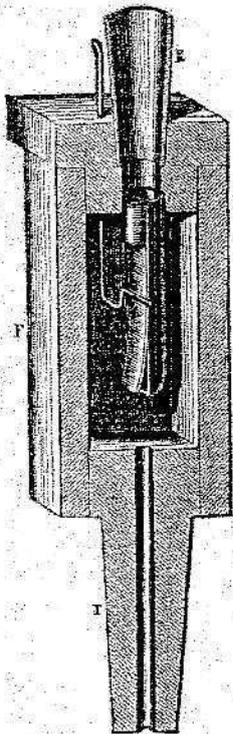


Fig. 12

A droite vue en coupe d'une embouchure de flûte.

A gauche et ci-dessous: embouchure à anche. L'anche est la pièce métallique *d* qui en vibrant ouvre et ferme la "rigole" *c*.



de mouvement, au niveau de l'anche se forme un ventre de *pression* et donc un nœud de mouvement. L'extrémité étant par ailleurs ouverte, la colonne d'air vibre là aussi en un *demi-fuseau*.

La fig. 8b montre que les harmoniques correspondront alors à des vibrations en $3/2$ fuseaux, $5/2$, etc. Au lieu "d'octavier" comme tout à l'heure la flûte, un tel tuyau ne peut que "quintoyer" ("douzoyer" devrait-on dire, puisque l'on monte d'une quinte *plus* une octave). Plus généralement on n'obtiendra donc que les harmoniques *impairs* (fréquences triples, quintuples, etc. du fondamental) ce qui contribue bien sûr à donner à ces instruments un son très différent de celui de la flûte

(comparez, fig. 10B, le "spectre des partiels" de la flûte et de la clarinette).

Plaques et membranes vibrantes.

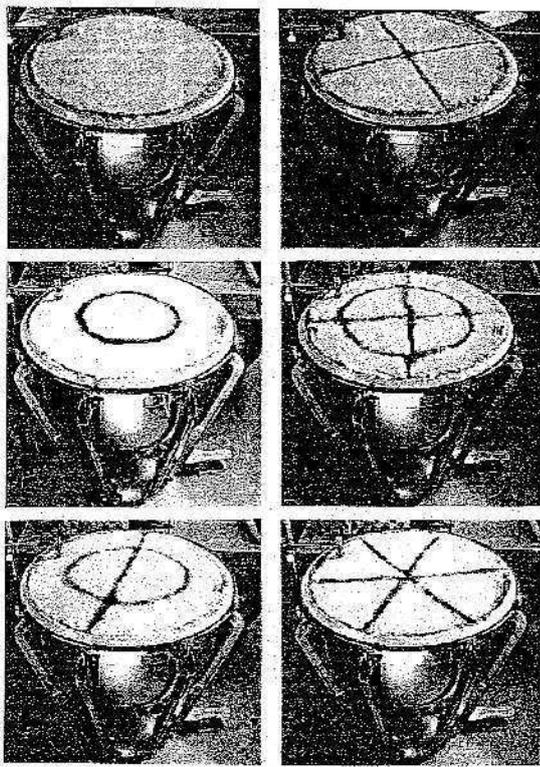
Jean- Nicolas va reprendre son archet pour vous montrer les manières très diverses dont peut vibrer une plaque: il tente d'obtenir quelques "figures de Chladni"¹⁴ (photos 13) dessinées par de petits grains de sable de Fontainebleau, qu'on voit d'abord s'agiter fortement dans certaines régions puis se rassembler sur les "lignes nodales" (de mouvement nul).

On remarque que plus le son émis est strident, riche en composantes aiguës, plus les zones obtenues sont petites et nombreuses... On remarque aussi que l'on ne perçoit pas une "note" bien déterminée, et cela parce que les fréquences correspondant aux divers modes de vibration ne sont plus dans les rapports *entiers* simples obtenus dans le cas des cordes. C'est pour cela que la plupart des "percussions", à plaques ou membranes, émettent des *bruits* par opposition aux *notes* (ou *sous musicaux*).

¹⁴ l'inventeur, vers 1800, de la méthode.

La méthode de Chladni n'est pas seulement l'occasion d'expériences spectaculaires : elle a permis, récemment encore, d'étudier les modes de vibrations des membranes de timbales¹⁵ ou des fonds de violon, et de distinguer ainsi des fonds plus ou moins bien accordés (fig. 13 et 14 ci-contre¹⁶).

Fig. 13



"Tables d'harmonie" et "caisses de résonance"

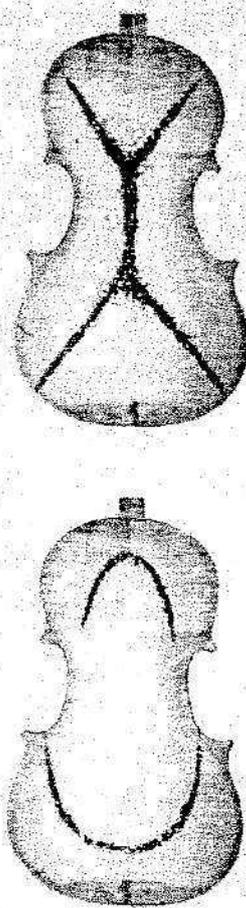
Entendez-vous le diapason que je viens de frapper ? Non ! (moi, si, en l'approchant de l'oreille!) Mais si je le pose sur sa caisse de résonance vous l'entendez très distinctement.

De même, sans leur "table d'harmonie" et leur "caisse de résonance", les instruments à cordes tels que violoncelle, piano, harpe seraient pratiquement inaudibles!

Qu'est-ce donc que la résonance ?

Expériences: Je mets face à face deux diapasons identiques, posés sur leur caisse de résonance et je frappe l'un des deux. Vous entendez un beau "la 440 hertz".

Fig. 14



J'arrête la vibration en saisissant les branches. Pourtant vous entendez se prolonger le la. C'est le diapason que je n'ai pas touché qui s'est mis à vibrer ! (Preuve : je saisis aussi ses branches → silence!). Si maintenant je modifie un tout petit peu la note émise par le premier diapason (grâce à une petite surcharge)¹⁷ le second ne se laisse presque plus exciter ! La résonance suppose donc un accord excellent entre la note du diapason "excitateur" et celle du diapason "résonateur".

Voici maintenant une série de diapasons do - mi - sol.. (photo n°14). On remarque que la dimension de chaque caisse est choisie pour que la longueur de la colonne d'air lui permette d'entrer en résonance avec la note du diapason. Voyez par exemple la longueur de la caisse du do : c'est la moitié de la longueur du tuyau d'orgue ouvert qui donnait le même do, ce à quoi l'on s'attend bien puisque cette caisse est fermée à une extrémité.

On dit parfois que la caisse de résonance d'un instrument "amplifie le son". Cette façon de dire peut prêter à confusion en laissant croire qu'elle émet plus d'énergie sonore qu'elle n'en reçoit, à la manière de l'ampli d'une chaîne haute fidélité, qui utilise pour cela l'énergie fournie par l'alimentation électrique.

L'explication est autre : si mon diapason n'a pas de caisse de résonance, vous l'entendez très faiblement, mais il vibrera très longtemps (vous pourrez l'entendre plusieurs minutes!) car il transmet très peu d'énergie à l'air environnant. Par contre, lorsqu'il est monté sur sa caisse de résonance, il lui transmet de l'énergie beaucoup plus rapidement, énergie que la caisse utilise à "mettre en branle" beaucoup plus d'air autour d'elle (pour vous éventer, mieux vaut agiter un éventail qu'un cure dent¹⁸). La conséquence est qu'il s'arrêtera beaucoup plus rapidement de vibrer.

¹⁵ Un des rares instruments à membrane à donner une "note" reconnaissable : on remarquera que les figures correspondant aux modes principaux sont beaucoup plus simples que pour la plaque carrée...

¹⁶ Source : encore une fois "les instruments de l'orchestre".

¹⁷ Mieux ! Il suffit que je le remplace par un diapason ancien de nos collections (la 435 hertz, moins aigu que le la actuel).

¹⁸ Image empruntée à l'un des auteurs de "les instruments de musique" : la corde de l'instrument est le cure-dent, sa table d'harmonie et sa caisse de résonance constituent l'éventail

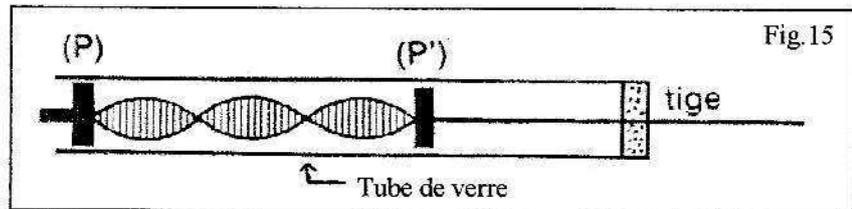
En fait cordes et tuyaux sonores sont ce qu'on appelle des "résonateurs à fréquences multiples".

La très belle expérience de la corde de Melde, l'illustre remarquablement¹⁹:

Expérience : pour faire entrer en vibration forcée cette longue corde, je l'excite par un vibreur dont je peux régler la fréquence. Un premier réglage f_1 provoque une vibration en un large fuseau. Puis lorsque j'augmente la fréquence, la vibration devient désordonnée, de très faible amplitude. Mais lorsque j'atteins $f_2 = 2 f_1$, vous voyez qu'elle entre à nouveau en résonance, vibrant en deux beaux fuseaux. Et ainsi de suite : 3 fuseaux pour $f_3 = 3 f_1$...

On dit qu'il y a résonance lorsqu'il y a accord entre la fréquence excitatrice et les "fréquences propres" de la corde.

L'expérience du tube de Kundt (fig.15) réalisée par Clélia montre comment la colonne d'air d'un tuyau rentre en résonance pour la note émise par une tige frottée excitatrice :

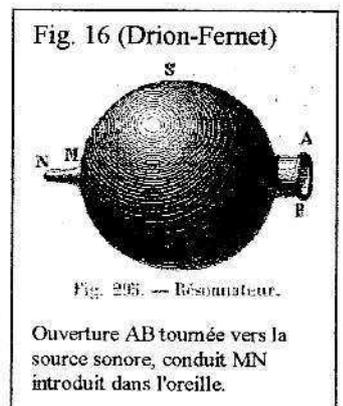


La tige, frottée suivant son axe, met le piston P' en vibration longitudinale de fréquence élevée (son très aigu). Vous voyez alors la poudre légère disposée dans le tube de verre s'agiter, s'étaler là où le mouvement est important et dessiner ainsi des fuseaux qui mesurent quelques centimètres. Dans cette version de l'expérience on varie la longueur $L = PP'$ et on constate la résonance (forte agitation, fuseaux nets) chaque fois que $L = n\lambda/2$. En remplaçant la tige par un très petit haut-parleur émettant en P' une note de fréquence variable, L étant fixée, on verrait que la colonne d'air, comme la corde de Melde, entre en résonance "en un fuseau" pour une première fréquence f_1 , puis en 2 fuseaux pour $f_2 = 2 f_1$, etc.

Les résonateurs de Helmholtz :

Ces superbes sphères creuses de laiton (fig.16 et photo 15) ont la particularité grâce à leur forme sphérique de n'avoir contrairement aux tuyaux cylindriques pratiquement qu'une fréquence de résonance. La série do sol do mi sol si bémol que nous possédons servait, avant l'analyse par micro et ordinateur, à détecter les harmoniques présents dans la note "do grave" jouée par un instrument²⁰.

Pauline et Elodie vont vous faire constater par vous-même leur fonctionnement : elles distribuent les résonateurs, puis en approchent divers diapasons, à vous de trouver à la note de quel diapason votre résonateur "répond" (entre en résonance)!



Une belle expérience de résonance que vous pouvez réaliser avec un piano :

Libérez la corde d'un do grave (f_1) de son étouffoir (il suffit d'enfoncer légèrement la touche) puis jouez successivement (brièvement et fortement) les notes supérieures do sol do mi sol et si bémol : vous entendez ces notes se prolonger après en avoir relâché la touche. Leur étouffoir est donc retombé et c'est la corde "do grave" que vous entendez vibrer : elle est entrée en résonance (en plusieurs fuseaux) pour les fréquences harmoniques $f_2 = 2 f_1$, $f_3 = 3 f_1$. Si au lieu du do grave vous avez libéré la corde voisine (do dièse par exemple), le son s'arrête immédiatement. De même si vous essayez d'autres notes aiguës au hasard, vous constatez que le do grave ne résonne plus.

Inversement vous pouvez montrer que la note do grave "contient" un peu des harmoniques supérieures : frappez la fortement et libérez de leurs étouffoirs les cordes supérieures : vous constaterez que do, sol, do etc. - et celles là seulement - entrent en résonance...

Mais comment tables d'harmonie et caisses de résonance des instruments de musique peuvent-elles entrer en résonance pour les notes de toutes les cordes?

¹⁹ Elle est présentée dans l'appendice, sous une forme un peu différente, au §4 : on joue sur la longueur de corde, alors qu'ici on joue sur la fréquence excitatrice. On peut cependant se reporter à la figure 5 de l'appendice et à l'explication (§5).

²⁰ Donc obtenir ce que l'on a appelé plus haut le "spectre des partiels".

Les expériences précédentes mettaient en évidence des résonances "aiguës", c'est-à-dire exigeant un accord très précis entre excitateur et résonateur. Mais on ne souhaite pas que la caisse de résonance d'un violon entre en résonance pour, mettons, un fa dièse et pas du tout pour les notes voisines! Et heureusement, en pratique, l'intensité sonore d'un violon reste bien sensiblement constante dans une large étendue de fréquences. Et il en est ainsi pour tous les instruments à cordes. Comment cela se fait-il ?

D'abord, lorsque les vibrations sont "amorties" (par les frottements internes aux matériaux, par exemple) la résonance est moindre - dommage! - mais elle est aussi moins aiguë : elle s'étend à tout un *domaine* de fréquences, on dit qu'elle est "floue". Ensuite, "table", "fond", et volume d'air de la caisse sont tous trois des résonateurs à fréquences *multiples*, et relativement rapprochées - on a vu avec les figures de Chladni que les plaques avaient des modes de vibration très nombreux. Grâce au "flou" autour de chaque fréquence propre il y aura donc - plus ou moins²¹ - résonance pour toutes les notes jouées.

Récapitulons : que se passe-t-il lorsque vous jouez une note sur un instrument de musique ?

Dans le cas d'un instrument à corde, la vibration est libre, et non "forcée" comme dans l'expérience de mezlde. La corde "choisit" alors d'osciller selon l'un ou l'autre des modes correspondant à ses fréquences propres, ou plus exactement selon un mélange de ces modes qui dépend de la façon dont on l'a excitée.

Sa vibration est transmise à la table d'harmonie et à l'air de la caisse de résonance et y provoque l'établissement d'ondes stationnaires. Une partie de l'énergie vibratoire sert à mettre en vibration l'air environnant et à faire s'y propager l'onde progressive qui atteint les oreilles des auditeurs éventuels.

Le "rendement énergétique" d'un violon n'est pas grandiose : 98 à 99% de l'énergie fournie à l'archet sont dissipés en chaleur et sur le peu qui reste pour mettre en vibration la corde et la caisse de résonance, c'est de nouveau un petit pourcentage qu'on retrouvera dans l'onde progressive. Comme cette dernière est émise dans toutes les directions de l'espace et pas seulement vers le pavillon de *votre* oreille, il y a de quoi être rempli d'admiration pour la sensibilité de notre merveilleux récepteur sonore!

Dans le cas d'un instrument à vent, une question n'a pas été abordée : comment un jet d'air - souffle de l'instrumentiste, soufflerie de l'orgue - qui n'a à priori aucun caractère vibratoire peut-il provoquer la formation d'ondes stationnaires dans le tuyau de l'instrument ? (Il n'y a pas comme dans le tube de Kundt d'excitateur imposant une fréquence déterminée).

La réponse détaillée est très complexe²².

En gros dans le cas d'un tuyau d'orgue à embouchure de flûte, le biseau de l'embouchure engendre des turbulences d'où, par exemple, une très brève surpression momentanée à l'entrée de la colonne d'air. Cette surpression est un "signal" qui va se propager vers l'extrémité, s'y réfléchir, revenir donc vers l'embouchure, s'y réfléchir à nouveau tout en interagissant avec le jet d'air. Cela impose donc au jet lui-même des oscillations à un rythme qui correspond aux fréquences propres de la colonne.

Dans le cas d'une embouchure à anche, l'anche de roseau d'une clarinette ou d'un hautbois n'a pas une fréquence propre nettement déterminée - contrairement aux anches métalliques qui déterminent chaque note d'un harmonica. Là aussi le jet d'air, en "ouvrant" l'anche va provoquer une surpression à l'entrée du tuyau. Les réflexions successives de cette surpression provoqueront fermetures et réouvertures de l'anche²³. Ce sont là aussi les fréquences de vibration de la colonne d'air qui dictent à l'anche son rythme d'oscillation : *elle est asservie au tuyau*.

Bref dans les deux cas le rôle de l'anche ou du jet d'air est un rôle d'apport d'énergie par des impulsions dont le tuyau sonore commande le rythme.

Cet apport d'énergie entretient alors la vibration, compensant ainsi les déperditions par les divers frottements mais aussi bien sûr par émission sonore : un certain pourcentage (quelques %) de l'énergie de vibration "sort" des instruments à vent par les trous ou les pavillons, vers les auditeurs, sous forme d'onde progressive.

²¹ Ce "plus ou moins" a son importance : d'un violon à un autre par exemple, les "pics" de résonance ne sont pas les mêmes et sont d'importance inégale. De ce point de vue - entre autres - il y a quelques différences entre un "crin-crin" et un Stradivarius!

²² Encore une fois, voir à ce sujet "Les instruments de l'orchestre" collection "pour la science" éditions Belin.

²³ Voir l'article de Laloë sur la clarinette dans la référence ci-dessus : l'étude des réflexions doit tenir compte du renversement d'une surpression en dépression si une extrémité est un nœud de pression...

On peut comparer cela à l'horloge comtoise dont le balancier commande à son propre rythme, l'apport d'énergie, lié à la descente du poids, qui est nécessaire à l'entretien de son mouvement.

La colonne d'air du tuyau sonore d'un instrument à vent est, comme le balancier de l'horloge, un "oscillateur autoentretenu".

Un "instrument" dont on n'a pas parlé : la voix des chanteurs.

On se contentera ici de dire qu'on trouve encore des cordes vibrantes, les "cordes vocales", et une cavité résonante, la cavité buccale, dont la longueur et la forme jouent un rôle essentiel dans la note émise, sa richesse en harmoniques, etc.²⁴

Pour finir : quelques repères chronologiques.

Dates	Physique	Instruments de musique
<ul style="list-style-type: none"> 6^{ème} s. avant J.C. 2^{ème} av. J.C. 	<p><u>Pythagore</u> : longueurs de cordes et intervalles musicaux</p>	<p>Orgue à clavier (Alexandrie)</p>
<ul style="list-style-type: none"> Moyen-Age 	<p>(octave, quarte, quinte: fondements de la musique polyphonique occidentale)</p>	<p>Rebec, luth</p>
<ul style="list-style-type: none"> 15^{ème} s. 		<p>Clavicorde (clavier, cordes frappées)</p>
<ul style="list-style-type: none"> 16^{ème} s. 	<p>(gamme de <u>Zarlino</u>, compositeur italien)</p>	<p>Epinette, virginal (cordes pincées) Violes, Clavecin</p>
<ul style="list-style-type: none"> 17^{ème} s. 	<p><u>Galilée</u>, <u>Mersenne</u> : résonance, fréquence, lois des tuyaux sonores et cordes <u>Hooke</u>, <u>Saveur</u> : timbres, harmoniques.</p>	<p>Fin 16^{ème} : violon (<u>Amati</u>) Fin 17^{ème} début 18^{ème} : violons de <u>Stradivari</u> et <u>Guarneri</u></p>
<ul style="list-style-type: none"> 18^{ème} s. 	<p>(gamme tempérée : fin 17^{ème}, s'impose au 18^{ème} sous l'influence de <u>Bach</u> <u>Fourier</u> (1736-1830): théorie mathématique de la décomposition d'un son en harmoniques. Entre 1760 et 1770 <u>Bernoulli</u>, <u>Euler</u>, <u>Lagrange</u>, <u>D'Alembert</u> : théorie de la propagation sonore, théorie des cordes vibrantes et tuyaux. Vers 1800 : <u>Chladni</u>, <u>Poisson</u> : plaques et membranes.</p>	<p>et <u>Rameau</u>) 1709 <u>Christofori</u> : pianoforte</p>
<ul style="list-style-type: none"> 19^{ème} s. 	<p><u>Koenig</u> (méthode des flammes manométriques) <u>Savart</u> et l'étude des "plaques" de violon, l'observation des vibrations dans les tuyaux. 2^{ème} moitié du siècle : <u>Helmholtz</u> et <u>Rayleigh</u> donnent son plein développement à la théorie des sons et à leur analyse.</p>	<p>1855 piano <u>Steinway</u> (cadre en fonte)</p>
<ul style="list-style-type: none"> 20^{ème} 	<p><u>Bouasse</u> et la théorie des instruments à vent. Gros progrès, avec l'électronique et l'informatique, dans l'analyse détaillée des instruments de musique.</p>	<p>Instruments basés sur l'électronique et l'électroacoustique.</p>

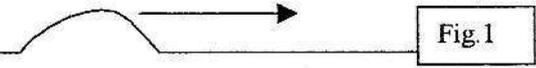
²⁴ Voir note 22!

Appendice :

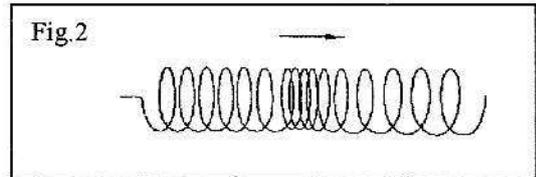
Généralités sur les ondes.

1. Propagation d'un signal : voyez se déplacer la ride que je viens de créer à la surface de l'eau, ou la "bosse" résultant du bref ébranlement transversal que j'imprime à un long ressort, ou à un long tuyau (ou corde) de caoutchouc.

La perturbation étant perpendiculaire (ici, verticale) à la direction de propagation (ici, horizontale), on dit qu'il s'agit d'un signal transversal.

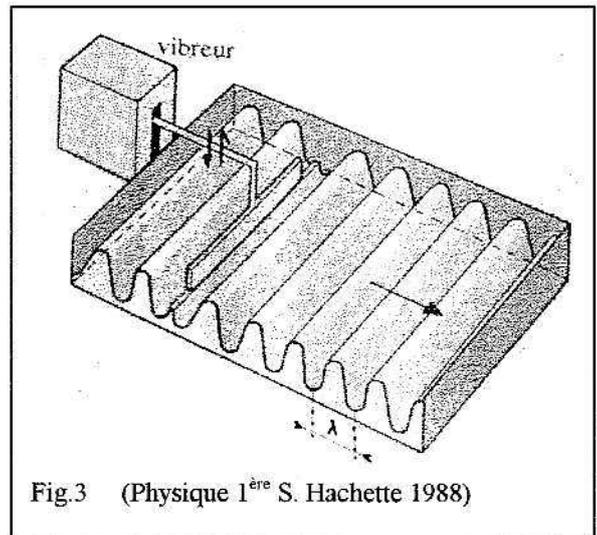


Maintenant, à une extrémité d'un long ressort à boudin tendu, je comprime quelques spires, puis les relâche. On voit se propager la zone comprimée. La perturbation (spires déplacées momentanément vers la gauche ou la droite) est cette fois de même direction que la propagation : il s'agit d'un signal longitudinal.



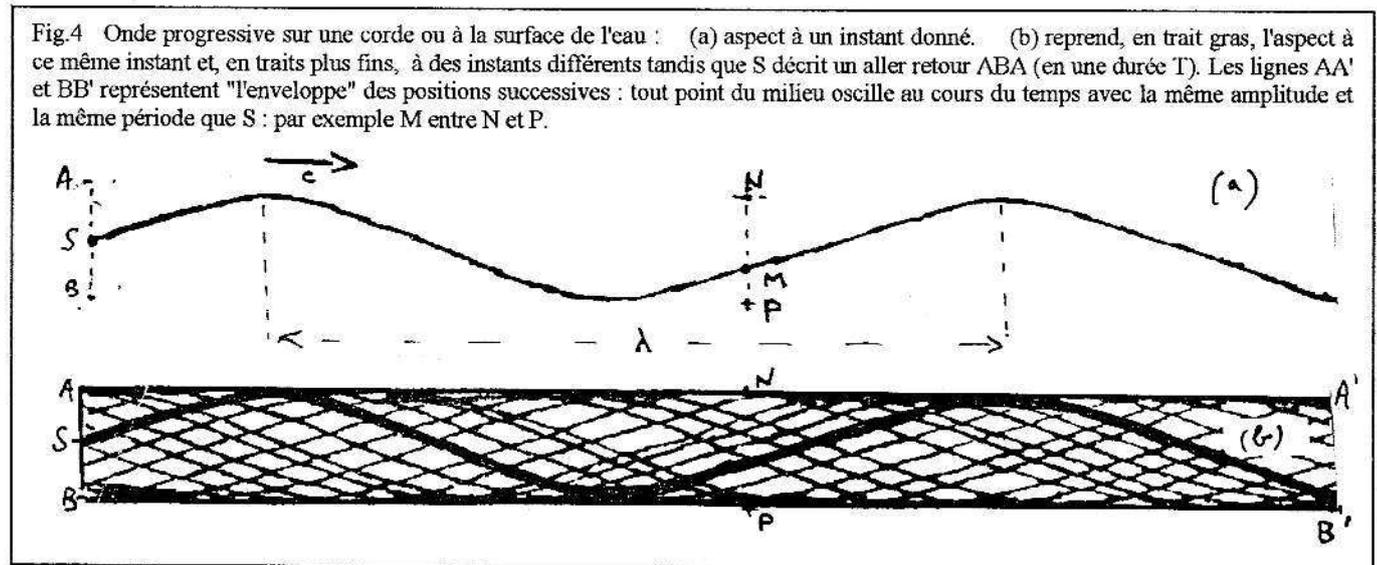
On peut vérifier expérimentalement que dans la plupart des cas la vitesse de propagation d'un signal de type donné dépend peu de l'amplitude et de la forme de la perturbation : c'est une propriété du *milieu de propagation* (par exemple : pour les signaux longitudinaux dans l'air à 15°C la "célérité" c vaut 340 m/s).

2. Ondes progressives : si des signaux identiques se répètent périodiquement leur propagation engendre une onde "progressive". On l'observe aisément si un dispositif ("source") provoque une vibration périodique à une extrémité du milieu de propagation (corde, ressort, plan d'eau...) et si le milieu de propagation est "infini" : il faut en effet éviter le phénomène de réflexion des signaux à l'autre extrémité (qui perturberait l'observation comme on le verra plus loin). En pratique il suffit de munir cette extrémité d'un dispositif absorbant.



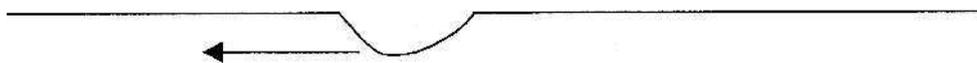
Exemple (fig.3) : grâce à une réglette animée par un vibreur, je fais apparaître sur la "cuve à ondes" des ondes progressives transversales (à droite de la cuve une bordure de mousse "absorbe" les vaguelettes).

La distance entre deux "crêtes" successives est la longueur d'onde λ . C'est aussi la distance parcourue par le signal pendant la durée T (période) d'une oscillation complète (un "aller-retour") de la source. D'où la relation¹ $\lambda = c T$. La fig.4 résume la description d'une onde progressive.



¹ Formule (2) de la récapitulation des définitions et formules utiles que l'on trouvera en 3^{ème} partie.

3. Réflexion d'un signal : que se passe-t-il lorsque le signal représenté fig.1 rencontre, à droite, une **extrémité fixe** (point d'attache d'une corde par exemple) ? Si l'on fait l'expérience on constate qu'il revient en sens inverse, "**renversé**" (une crête devient un creux, et réciproquement).



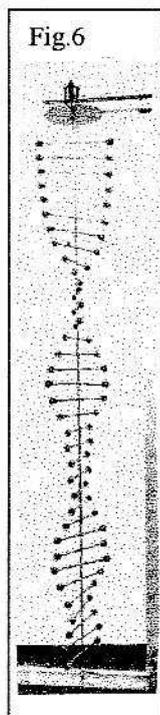
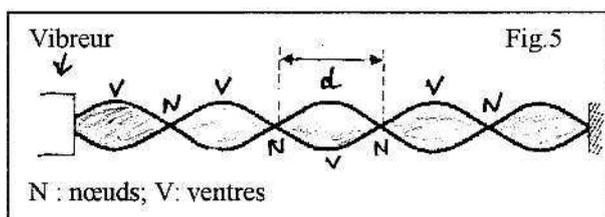
Si l'extrémité est *libre*, on observe également une réflexion, mais *sans renversement* du signal.

4. Réflexion d'une onde progressive; onde stationnaire : que se passe-t-il si c'est maintenant une *onde progressive* qui se réfléchit sur une extrémité E? Pour faire l'expérience, il suffit de supprimer le dispositif absorbant du §2. Alors l'onde incidente émise par S se réfléchit en E, puis l'onde réfléchie va subir à son tour une réflexion en S, etc..

Expérience 1 : je reprends le dispositif de la figure 3 mais en plaçant du côté droit un obstacle vertical rigide (en pratique, une plaque de verre). Vous constatez alors (pour un réglage approprié de la distance réglette - obstacle) :

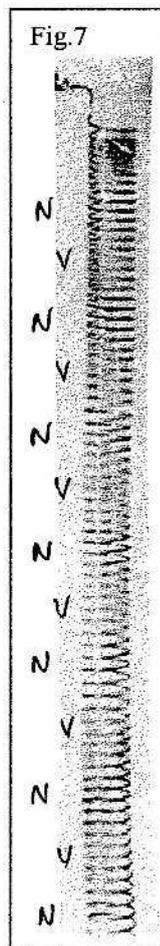
a. que l'onde ne progresse plus b. Que l'eau semble au contraire vibrer "sur place" (une observation rapprochée montre, parallèlement à la réglette, des lignes immobiles, et entre ces lignes dites "nodales" des lignes où l'eau oscille au contraire de bas en haut avec une grande amplitude)

Expérience 2 (expérience de Melde) : l'extrémité d'une corde est attachée à un vibreur, l'autre est fixe. Pour certaines longueurs de la corde, on voit la corde vibrer avec une forte amplitude en 1, 2, 3,... "**fuseaux**". Certains points sont fixes, les "**nœuds**", l'amplitude est au contraire maximale aux "**ventres**".



Expérience 3 : j'utilise "l'échelle de perroquet", dispositif représenté fig.6 : des barreaux sont accrochés à un ruban d'acier. Un petit moteur permet de communiquer au bas de l'échelle un mouvement alternatif de rotation. Si en haut fonctionne un dispositif absorbant, on observe alors une onde progressive : la courbe dessinée par les extrémités des barreaux est analogue à celle de la fig.4 et suit la même évolution dans le temps. Mais si on supprime ce dispositif on voit au contraire s'établir un régime très différent : certains barreaux n'oscillent plus ("nœuds"), d'autres oscillent très fortement ("ventres"). On peut choisir de laisser l'extrémité supérieure *libre* en rotation, et on y observe alors un ventre. Si on la fixe on obtient au contraire un nœud.

Expérience 4 : avec un ressort on met en évidence (fig.7) le résultat de la superposition d'ondes progressives longitudinales incidente et réfléchies. Sur la photo, les zones nettes correspondent aux spires immobiles, les zones floues sont celles où le mouvement des spires est important. Par analogie avec corde ou échelle de perroquet on parlera encore de nœuds (N) et "ventres" (V) et on appellera même "fuseau" la portion de ressort comprise entre deux nœuds.



Conclusion : la superposition³ d'ondes progressives se propageant en sens inverse donne naissance à une "onde stationnaire".

5. L'onde stationnaire : interprétation

En certains points du milieu, un "creux" de l'onde progressive réfléchie en E arrive systématiquement en même temps qu'une "crête" de l'onde incidente issue de S, et inversement. On dit que l'interférence est destructive. Ces points resteront donc immobiles, ce sont les nœuds. Au contraire en d'autres points, une "crête" incidente coïncide avec une crête

² Voir fin du §5.

³ Le terme employé par les physiciens est celui d'interférence

réfléchi, un creux avec un creux, l'interférence est constructive, d'où un "ventre".

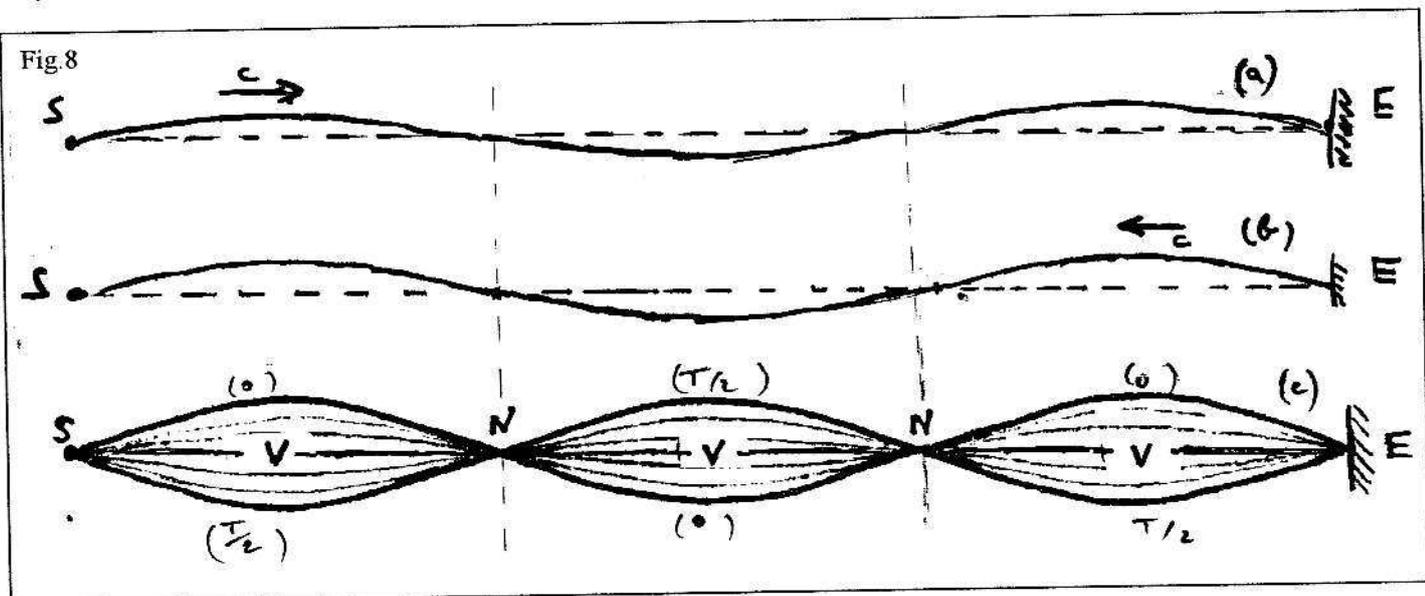
Ceci pourrait être expliqué par des calculs simples. Plus simplement encore (mais avec un crayon et un peu de patience!) on peut construire la fig.8 interprétant l'expérience de Melde :

Reprenons l'onde progressive de la fig.4, et associons-lui une onde réfléchi sur l'extrémité E. Supposons qu'à $t = 0$ l'onde incidente soit (a), alors l'onde réfléchi au même instant est (b) (la crête venant de E est en effet la réflexion du creux incident qui abordait E une demi-période plus tôt). Si l'on additionne les déformations (a) et (b) on obtient en (c) la forme désignée par (0).

A $t = T/4$ (un quart de période plus tard) (a) et (b) ont "glissé" l'un vers l'autre d'un quart de longueur d'onde, de telle sorte qu'en N une crête de l'un coïncide avec un creux de l'autre, tandis que les "zéros" de (a) et (b) coïncident en V, et plus généralement la somme algébrique des déformations est nulle partout : en (c) la corde a pour forme la ligne droite SE.

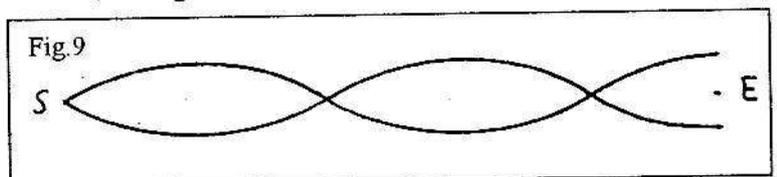
A $t = T/2$ (a) et (b) ayant, depuis $t = 0$, glissé d'une demi longueur d'onde crêtes et creux se sont inversés, et la forme obtenue est celle désignée par (T/2).

En étant patient on peut faire le même travail à plusieurs autres dates entre 0 et T, d'où les formes intermédiaires représentées en (c).



Il ressort de cette construction que la longueur d'un fuseau est $\lambda/2$.

Cas d'une extrémité libre : à cette extrémité, le signal réfléchi n'est pas renversé, incident et réfléchi y interfèrent donc constructivement et cette extrémité sera donc un ventre, comme sur l'exemple de la fig.9.



Condition pour que s'établissent des ondes stationnaires d'amplitude importante :

Dans les expériences du S4 on n'observait l'établissement d'un phénomène stable, nettement visible, d'ondes stationnaires, qu'à la condition de régler correctement la distance L entre "source" et extrémité.

L'interprétation donnée fig.8 ne tient compte en effet que de deux ondes progressives de sens de propagation inverse, ce qui correspondrait en pratique à une seule extrémité réfléchissante. Mais un milieu de propagation réel est en général limité à ses deux extrémités⁴, et l'on a donc des réflexions multiples : l'onde réfléchi en E va à son tour se réfléchir en S, etc. et l'interférence de ces ondes avec les deux premières n'est pas forcément constructive! Il est assez facile de voir qu'elle sera systématiquement constructive si la longueur L séparant les deux extrémités est un multiple entier de la longueur d'un fuseau, du moins dans le cas où S et E sont deux extrémités fixes (cas de la fig.8) ou bien deux extrémités libres. Dans le cas contraire (fig.9), il faut k fuseaux + $\frac{1}{2}$ fuseau.

La condition est donc : $L = k \lambda/2$ (cas de la fig.8) ou $L = k\lambda/2 + \lambda/4$ (cas de la fig.9).

Dès que L s'écarte de ces valeurs, il se trouve toujours une n^{ème} réflexion pour interférer destructivement avec une des précédentes, et le phénomène est alors inexistant ou de faible amplitude.

Lorsque la condition est respectée on dit qu'il y a **résonance** du milieu de propagation pour la fréquence de vibration considérée.

⁴ C'est bien sûr le cas des cordes vibrantes et tuyaux sonores rencontrés en acoustique !

Quelques définitions et formules :

Période, fréquence, longueur d'onde.

Note donnée par corde ou tuyau de longueur L .

période T d'une vibration: c'est la durée d'une oscillation complète ("aller et retour")

fréquence f : nombre de vibrations par unité de temps \rightarrow $f_{\text{(hertz)}} = 1/T_{\text{(secondes)}} \quad (1)$

longueur d'onde λ : c'est la distance parcourue par la perturbation (ride à la surface de l'eau, "bosse" sur une corde, zone comprimée dans l'air...) pendant une période de la vibration de la source. D'où si dans le milieu considéré les perturbations se propagent avec la célérité c : $\lambda = c.T = c/f \quad (2)$

célérité c : dans l'air à température ordinaire ≈ 340 m/s

ébranlements transversaux le long d'une corde : $c = \sqrt{F/\mu} \quad (3)$

c en m/s si F est la tension de la corde en newtons et μ sa "masse linéique" (en kg/m)

longueur d'un "fuseau" = $\lambda/2$.

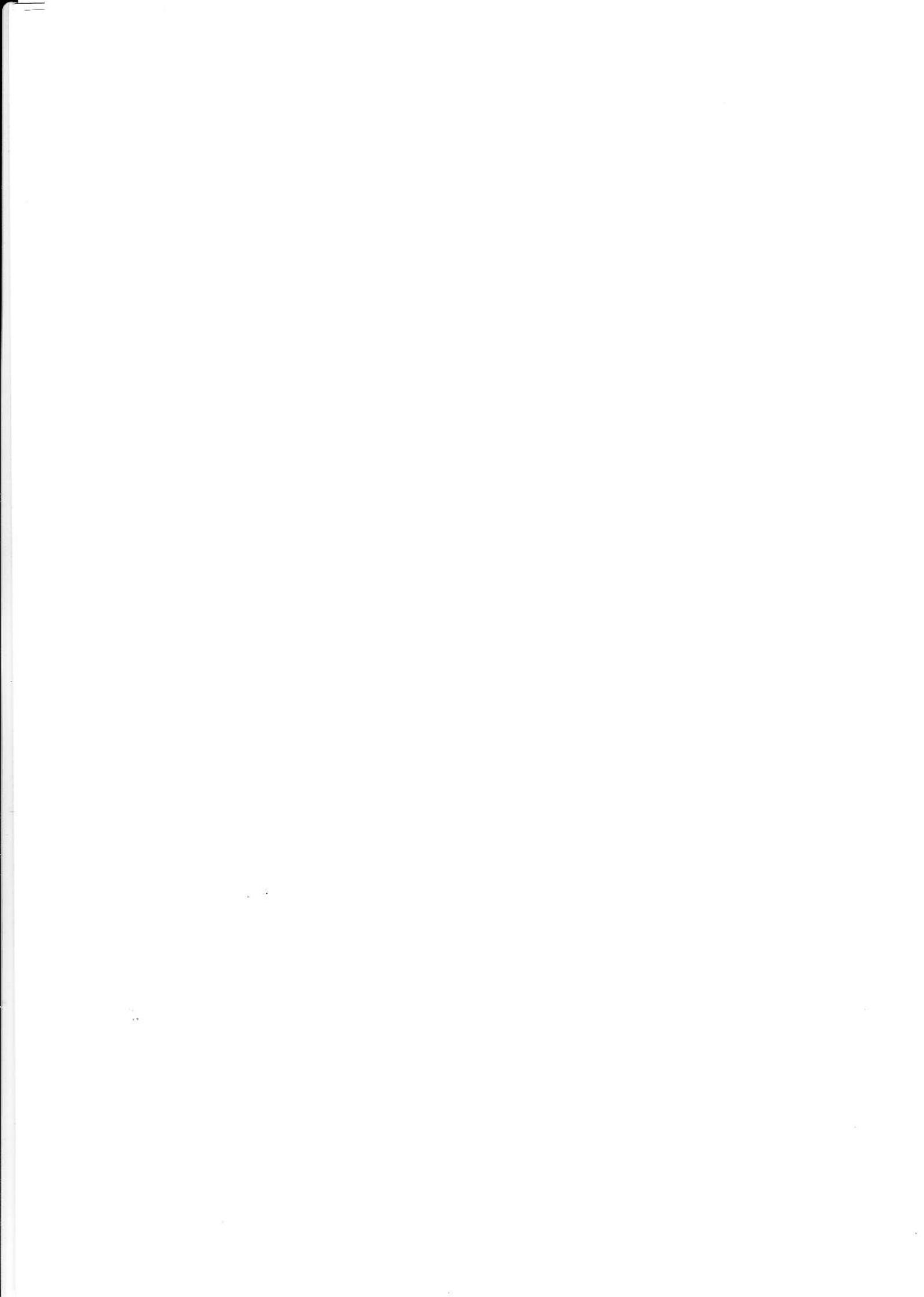
La note émise par une corde, ou un tuyau "ouvert" à embouchure de flûte, de longueur utile L , et vibrant en un seul fuseau est donc donnée par :

$$L = \lambda/2 = c/2f \quad \rightarrow \quad f = c/2L \quad (4)$$

Cas d'un tuyau sonore : c est alors la célérité dans l'air soit environ 340 m/s. On trouve donc $f \approx 440$ hertz (le *la* du diapason) pour $L = 0,39$ m. Puisqu'on doit doubler L pour diviser f par 2, le tuyau d'orgue donnant le *la* situé quatre octave plus bas (27,5 hertz) devrait mesurer $0,39.2^4 \approx 6$ m !

Pour une corde : compte tenu de l'expression (3) de c on obtient dans ce cas : $f = (\sqrt{F/\mu})/(2L) \quad (5)$

Par exemple on calcule qu'il faut une tension d'environ 200 newtons (20 "kilos") pour qu'une corde de longueur 50 cm et pesant 0,5 gramme donne le *la* 440 hertz !

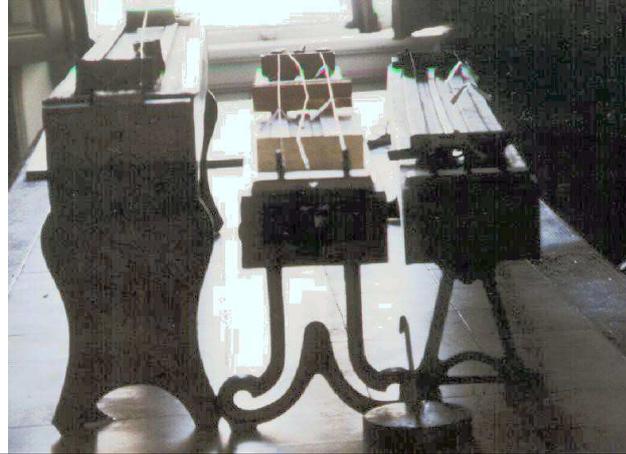


Les planches photo

1. Cloche



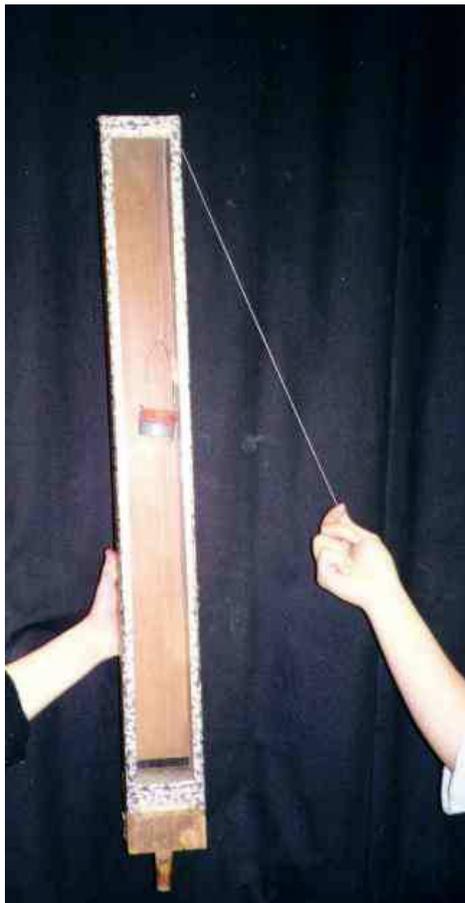
2. Sonomètres



3. Soufflerie, buffet d'orgue et tuyaux.



4. Tuyau à paroi de verre et plateau suspendu à un fil.

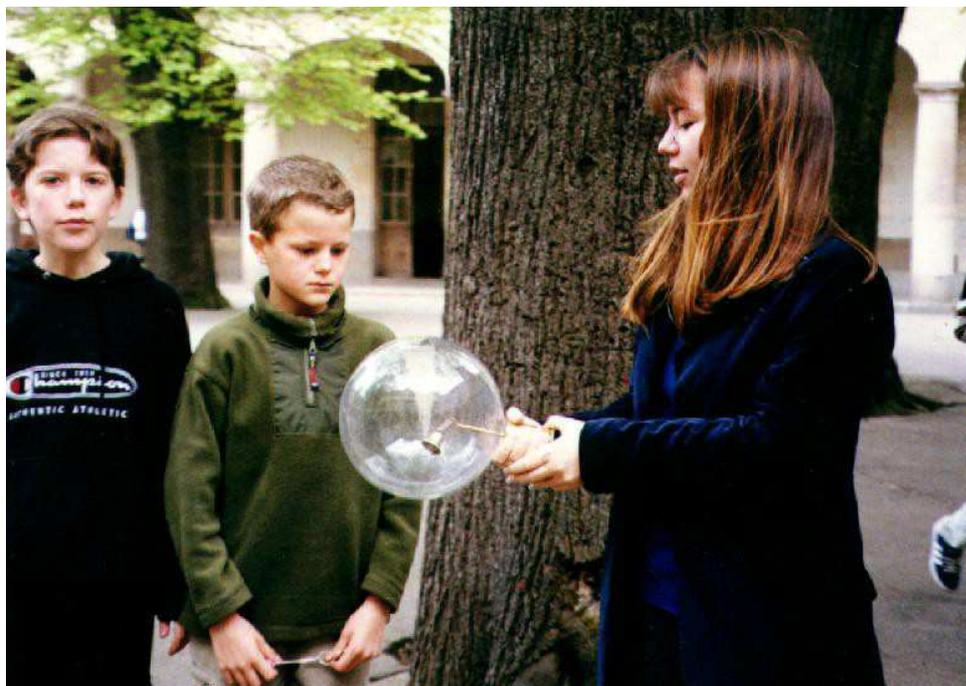
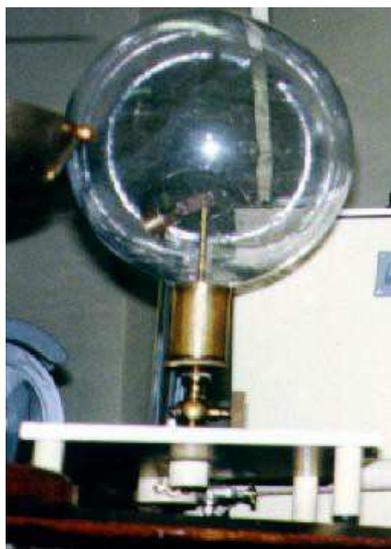


5. Tuyau muni d'un appareil à flammes manométriques



6. Clochette enfermée dans un ballon de verre

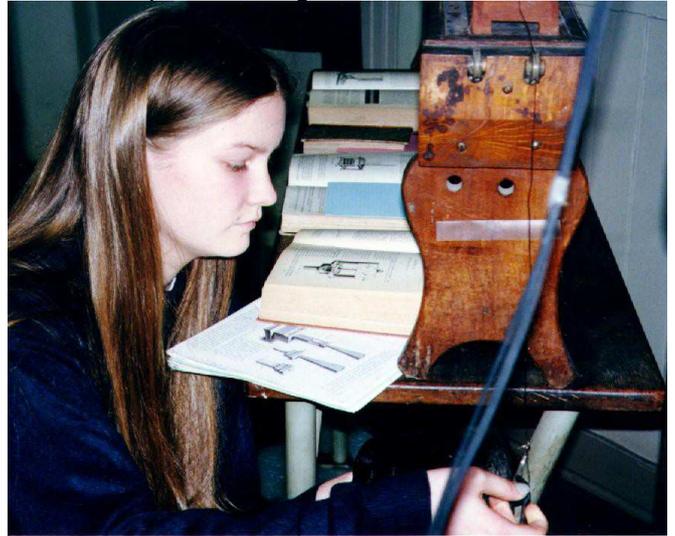
- a. sur la pompe à vide
 - b. démonstration
- (provenance: lycée Brizeux, Quimper)



7. On tend les cordes d'une harpe, comme celles d'un piano, en agissant avec une clé sur les chevilles



8. Jehane suspend des charges à la corde d'un sonomètre



9. Des "clés" permettent de choisir trous ouverts et fermés sur une flûte traversière



10. Divers tuyaux d'orgue à embouchure de flûte destinés à l'enseignement :
 a. à paroi de verre b. à paroi amovible (pour observer la structure de l'embouchure) et piston (permettant d'étudier le rôle de la longueur de colonne d'air dans un tuyau fermé)
 c. à tirette, permettant de transformer tuyau ouvert en tuyau fermé de longueur moitié.
 (provenance : ancienne école normale d'instituteurs)



11. Tuyau à tirette

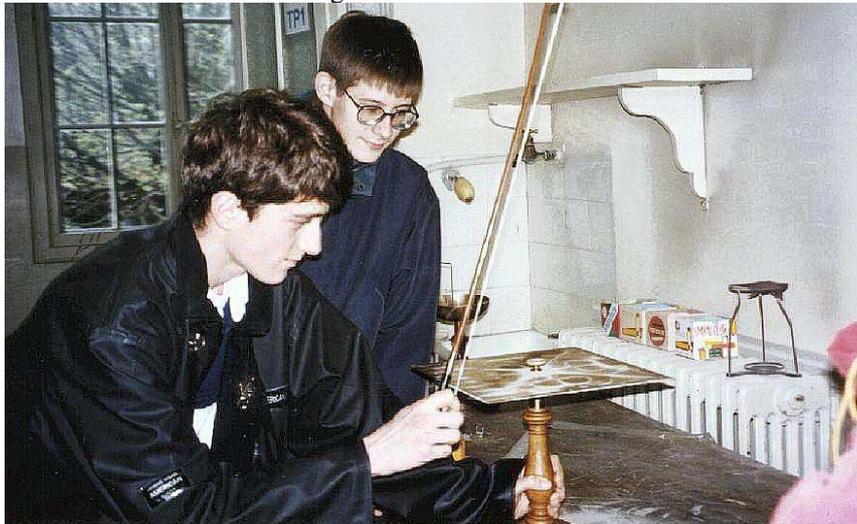


12. Tuyaux avec embouchures à anche :

Au premier plan, une "boîte à air" vitrée dans laquelle s'encastre le tuyau à anche du 2^d plan : on peut alors voir vibrer l'anche quand on souffle.



13. Jean-Nicolas obtient des figures de Chladni



14. Diapasons



15. Résonateurs de Helmholtz

