

Chapitre 1

Notions préalables en acoustique

1.1 Le son : objet de l'acoustique

1.1.1 Phénomène physique ou psychologique

Longtemps, la définition du mot *son* a donné lieu à des querelles. Au XIX^e siècle, les physiciens affirmaient que le son était la vibration physique d'un objet matériel. Cette vibration était réelle et existait en soi, qu'elle soit perçue ou non par un auditeur. Pour les philosophes, par contre, le son était une sensation qui n'était connue que par l'esprit (aujourd'hui dirait-on cerveau ?) de l'auditeur.

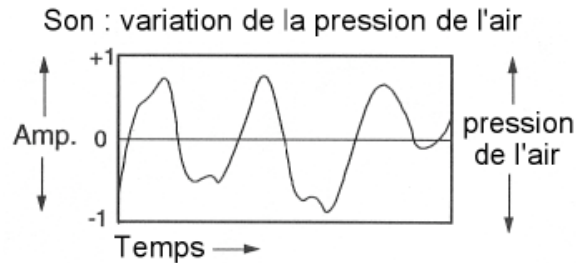
Quoique cette discussion n'existe plus aujourd'hui, le point de vue des philosophes du XIX^e siècle n'était pas dépourvu de sens, car le son n'est qu'un des phénomènes vibratoires qu'on rencontre dans plusieurs domaines de la physique (optique, électromagnétisme, ...) et bien souvent, ces phénomènes vibratoires sont utilisés pour enregistrer ou transmettre des signaux sonores. Pour qu'on puisse vraiment parler de son, il faudra une vibration mécanique dont l'amplitude et la fréquence sont telles qu'une oreille pourra y être sensible. En conclusion, le son est un phénomène *physico-psychologique*.

– Phénomène physique :

Le son est dû à l'oscillation des particules d'un milieu (à l'origine on trouve le plus souvent un solide) de part et d'autre d'une position ou d'un état d'équilibre, comme illustré sur la figure ci-dessous. Cette oscillation produira des variations de pression du milieu qui entoure immédiatement le corps en vibration (l'air le plus souvent) ; ces variations seront transmises de proche en proche pour éventuellement entraîner la membrane du tympan. Le son nécessite donc un milieu (gaz, liquide, solide). Il ne peut pas se propager dans le vide (exemple : dans l'espace).



L'amplitude (ou l'ambitus) de la variation de la pression atmosphérique donne la sensation d'intensité (force) au son.



La figure ci-dessus montre une représentation d'un son dans le domaine temporel (amplitude en fonction du temps). Lorsque la courbe est en haut du graphique, la pression atmosphérique est à son maximum (compression) et lorsqu'elle est au bas du graphique, elle est au minimum (raréfaction). L'amplitude de la forme d'onde est donc la quantité de variation de la pression atmosphérique.

– Phénomène psychologique :

Le son est une sensation. Les vibrations du tympan, transmises à l'oreille interne, provoqueront, si elles présentent les caractéristiques nécessaires, le départ d'influx nerveux que le cerveau reconnaîtra comme « son » et dont il tirera toute l'information utile : origine, distance, signification, annonce d'un danger, plaisir musical, ...

1.1.2 Le bruit

Une autre querelle, au début du XX^e siècle, a existé au sujet de la définition du mot son, mis en opposition au mot *bruit*.

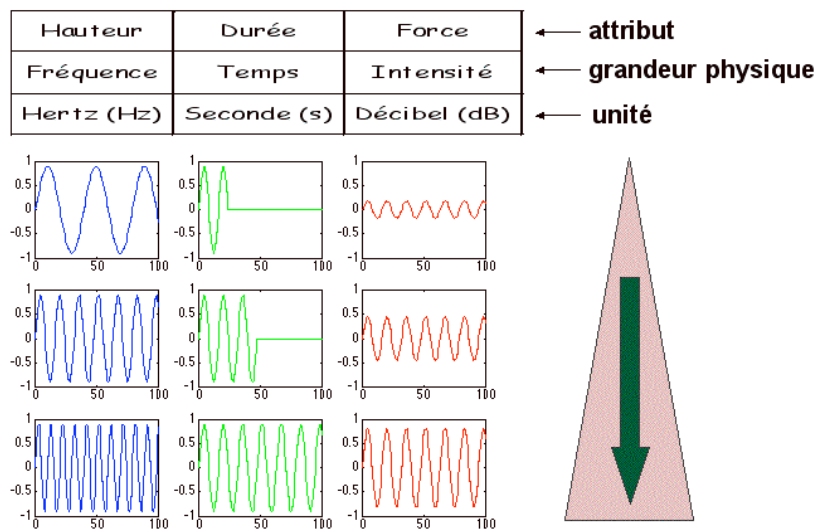
Le *son*, phénomène périodique (on verra plus tard qu'il s'agit des sons qui ont une hauteur musicale clairement perceptible) produirait sur l'oreille une sensation agréable et donc propre à la musique, tandis que le *bruit*, phénomène non périodique, produirait une sensation désagréable, donc non musicale. Cette distinction n'est acceptable ni du point de vue du musicien, ni de celui du physicien. Selon le contexte, le bruit pourra avoir trois définitions qui toutes, cependant, en font un cas particulier de son.

- a) Le bruit est défini par sa caractéristique de nuisance, d'indésirabilité, l'inconfort ou le danger qu'il représente pour l'auditeur. On considère parfois le bruit comme la « quatrième pollution du monde moderne ».
- b) Le bruit, toujours à cause de son indésirabilité, est mis en opposition avec le signal lorsqu'il désigne l'ensemble des parasites qui accompagnent le signal étudié et nuit à sa bonne transmission (ou réception). On parle du *rapport signal-sur-bruit* pour caractériser la qualité d'un canal de transmission ou d'un support pour un signal (comme une bande magnétique par exemple).
- c) Enfin, on conserve de l'ancienne querelle cette troisième définition du bruit : le bruit est un son résultant d'une vibration *non périodique*, utilisé comme source sonore musicale

ou source de laboratoire. Dans cette définition, on ne retient cependant pas l'aspect non esthétique qu'on prêtait alors au bruit.

1.2 Définitions des paramètres de la vibration entretenue

Les attributs d'une onde sonore et leurs grandeurs physiques correspondantes. Les graphiques illustrent chacune des grandeurs physiques, pour des valeurs croissantes de haut en bas.



Élongation (p)

Appelée parfois amplitude instantanée. C'est la valeur que prend à chaque instant la grandeur qui varie en fonction du temps. Le symbole utilisé sera adapté à la grandeur considérée. Ici, on a choisi p pour pression car le son est essentiellement une variation de pression autour de la pression atmosphérique. Mais on représentera parfois le déplacement d'un corps autour de sa position d'équilibre ou des variations de tension (en volts) ou de courant électrique (en ampères).

L'élongation est exprimée dans l'unité de la grandeur considérée, ici le Pascal (N/m^2).

Amplitude (A) et intensité

C'est l'élongation maximale. Dans une vibration entretenue, l'amplitude est une constante. L'intensité sonore est l'énergie transportée par l'onde sonore par unité de temps et de surface. Elle varie donc avec l'amplitude et est exprimée en W/m^2 ou en décibels (dB) (Nous y reviendrons dans le chapitre 5 sur l'intensité sonore). La sensation auditive qui lui est liée, sensation de « force » sonore, est appelée la *sonie*.

Temps (t) et durée

Le temps est mesuré à partir d'un temps 0 choisi arbitrairement. S'il est souvent donné en millisecondes (ms), il faut se rappeler que l'unité fondamentale dans le S.I. est la seconde (symbole : s et non $sec.$). La *durée* est la différence de temps entre le début et la fin d'un phénomène sonore.

Période (T)

C'est le temps mis pour accomplir une vibration complète. La période est souvent donnée en ms , mais pour l'utiliser dans une formule, il faut d'abord l'exprimer en secondes.

Comme l'amplitude, la période est un paramètre : elle est constante pour une vibration périodique entretenue. Un bruit, défini comme vibration apériodique, a une période infinie.

Fréquence (f)

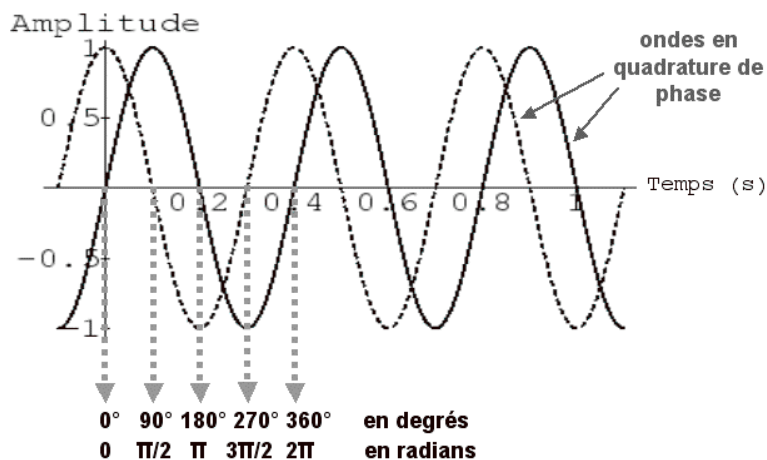
C'est le nombre de vibrations complètes (ou oscillations) effectuées par seconde. L'attribut perceptif de *hauteur* est lié à la fréquence. La fréquence est l'inverse de la période (vice-versa) :

$$f = \frac{1}{T}$$

Son unité est le Hertz (Hz), équivalent à s^{-1} , notation que l'on rencontre parfois, ainsi que « vibrations par seconde » ou « cycles par seconde » ; « par seconde » est implicite dans le nom de l'unité Hertz. Notons que l'oreille humaine est sensible aux ondes sonores dont les fréquences sont situées entre 20 Hz et 20 000 Hz.

Phase (ϕ)

La phase est un paramètre qui permet de préciser la position d'un corps vibrant au temps 0, par rapport à un point donné de son trajet. Conventionnellement, ce point sera choisi au moment où le corps est passé pour la dernière fois par sa position d'équilibre avec une orientation positive (passage par zéro en direction du positif).



En principe, la phase devrait être exprimée en radians ; on peut aussi l'exprimer en fraction de période T :

$T/4$	correspond à	$\frac{\pi}{2}$ ou 90°
$T/2$	correspond à	π ou 180°
$3T/4$	correspond à	$3\pi/2$ ou 270°
T	correspond à	2π ou 360°

1.2.1 Les son purs et les sons complexes

La nature de des vibrations acoustiques audibles peut être périodique ou non-périodique, ou encore une combinaison de ces deux natures. Les variations périodiques suivent un motif particulier, la forme d'onde, qui se répète dans le temps et donnent, en général, une sensation de hauteur alors que les variations non-périodiques donnent une sensation de bruit. Il est à noter que les sons naturels sont presque toujours semi-périodiques, c'est-à-dire qu'ils correspondent à une combinaison de variations périodiques et non-périodiques.

Dans le cas de sons périodiques, la durée du motif récurrent de la forme d'onde est la période T . Le nombre de fois que cette période se répète en une seconde nous donne sa fréquence fondamentale f que l'on exprime en Hertz (Hz). Lorsque le nombre de « périodes-par-seconde » décroît, la sensation de hauteur du son baisse et vice-versa.

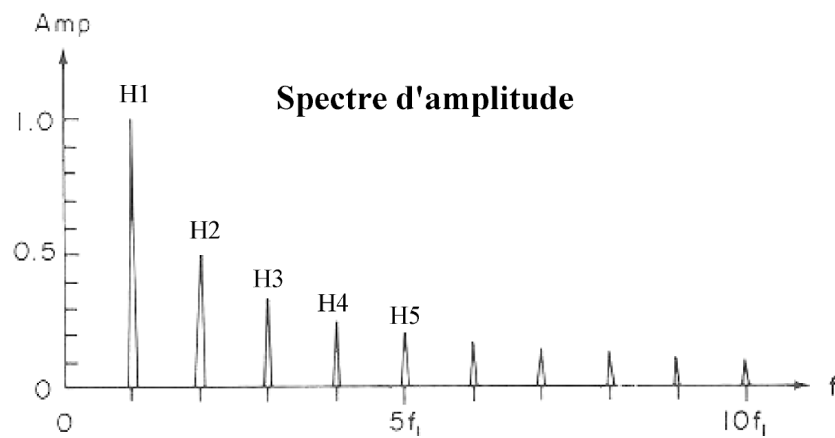
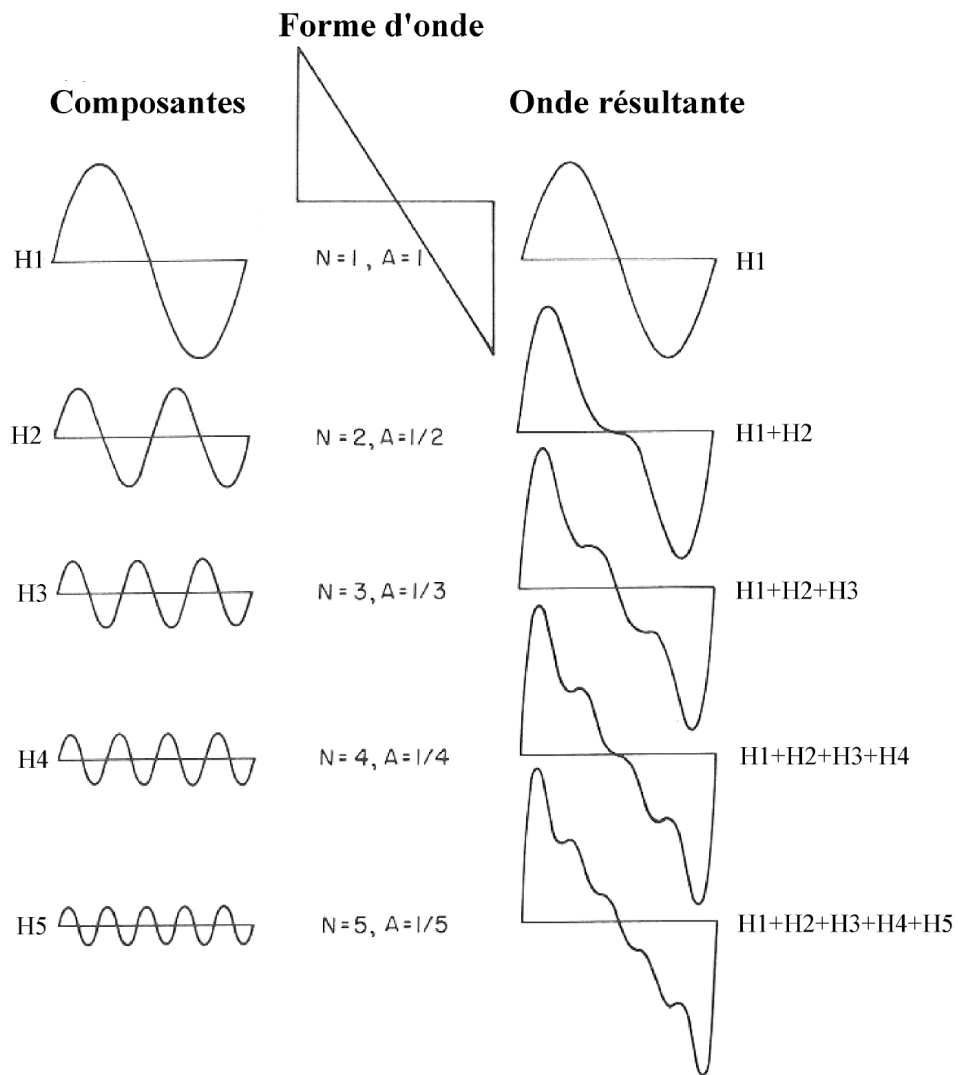
Si un son ne contient qu'une seule fréquence, on le dit sinusoïdal ou son pur. Bien que le son de la flûte s'en rapproche, les sons purs (strictement sinusoïdaux) ne se retrouvent pas dans la nature. Ce sont des sons de laboratoire. En général, les sons acoustiques contiennent des fréquences autres que la fréquence fondamentale. Celles-ci s'additionnent à la fréquence fondamentale pour former un son complexe, ce qui donne lieu à la perception du timbre d'un son.

Selon le mathématicien Joseph Fourier « Tout signal périodique peut être décomposé en une somme de composantes sinusoïdales dont les fréquences sont des multiples entiers d'une fréquence dite fondamentale ». Les fréquences additionnelles contenues dans un son complexe sont donc appelées harmoniques ou partiels selon qu'elles sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale ou pas.

1.2.2 Représentation du son dans le domaine fréquentiel

La représentation fréquentielle permet d'afficher les caractéristiques spectrales d'un signal audio. La figure ci-contre donne les représentations temporelle (forme d'onde) et fréquentielle (spectre d'amplitude) d'une onde en dent de scie. Comme la variation est périodique, on obtient un spectre de raies.

La représentation fréquentielle permet de voir le contenu fréquentiel de la forme d'onde. Dans cette représentation, l'amplitude de chaque raie indique l'amplitude de chacune des fréquences présentes dans le signal (les harmoniques). La figure illustre aussi la reconstruction progressive de l'onde par superposition de ses composantes harmoniques (d'ordre 1 à 5).



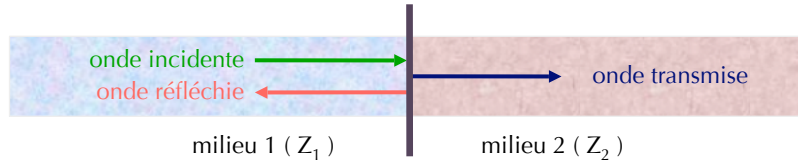
1.3 L'impédance acoustique

L'impédance acoustique est une *caractéristique d'un milieu* dans lequel une onde sonore se propage. L'impédance représente l'opposition du milieu à la déformation par une force extérieure. Elle exprime la relation entre la cause (la force) et l'effet (la vitesse de la particule soumise à cette force)¹. Ceci peut s'écrire :

$$Z = \frac{F}{v} \quad (1.1)$$

L'unité de l'impédance acoustique (dans les solides) est donc le Newton $\times$ seconde par mètre (N . s / m).

1.4 La réflexion en milieu linéaire



Un milieu où peut se propager le son (gaz, liquide, solide) est caractérisé par son impédance acoustique (résistance aux déplacements des molécules sous l'effet d'une variation de pression).

Une onde progressive unique ne peut se propager intégralement à travers une série de milieux différents que si les impédances de ces milieux sont égales ($Z_1 = Z_2$)

Si $Z_1 \neq Z_2$, une onde réfléchie apparaît et se propage selon la même direction que l'onde incidente mais *en sens inverse*. Son amplitude est d'autant plus grande que la discontinuité entre les deux milieux est marquée.

L'onde réfléchie empruntant son énergie à l'onde incidente, l'onde transmise est d'autant plus faible que l'onde réfléchie est forte.

1.5 La longueur d'onde

Une onde sonore périodique est *périodique* à la fois dans le *temps* et dans l'*espace*. La périodicité dans le temps est définie par la *période*, qui est la durée d'une oscillation complète (unité : la seconde). La périodicité dans l'espace est définie par la *longueur d'onde*, qui est définie comme la distance parcourue par une onde progressive pendant une période. Tous les points du milieu qui sont touchés par cette onde et séparés par une longueur d'onde (ou par un nombre entier de longueurs d'onde) vibrent en phase.

¹En électricité, l'impédance électrique représente l'opposition du milieu au passage du courant électrique. Elle s'exprime comme suit :

$$Z = \frac{U}{I}$$

où U est la tension électrique (la cause) et I est le courant électrique (l'effet).

Le symbole de la longueur d'onde est λ (lambda) et elle est exprimée en mètres. Sa relation avec la fréquence et la vitesse de propagation est

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

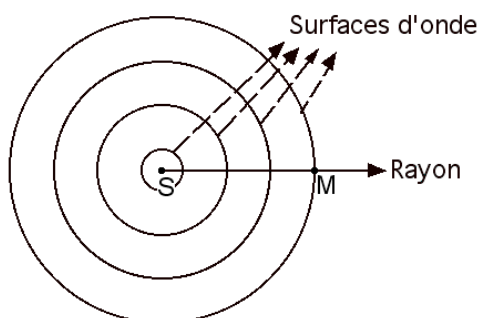
où c est donnée en m/s et f en Hz.

On peut en déduire que, pour un milieu donné et un type d'onde donné, la longueur d'onde λ et la fréquence f sont inversement proportionnelles : les hautes fréquences correspondent à de petites longueurs d'onde et vice-versa.

La longueur d'onde est une notion essentielle en acoustique musicale. On y a recours sans cesse qu'il s'agisse d'instruments de musique, de microphones ou de haut-parleurs, du comportement acoustique d'une salle de concert ou d'un studio d'enregistrement, qu'on veuille transmettre le son ou au contraire lui faire obstacle.

Surface d'onde

La figure ci-dessous représente des ondes sphériques en milieu homogène. On appelle *surface d'onde*, l'ensemble des points atteints par l'ébranlement après un intervalle de temps t .



Dans un milieu homogène, la vitesse de propagation est la même dans toutes les directions : les surfaces d'onde forment donc des sphères de centre S (source) et de rayon

$$r = SM = c \times t$$

où c est vitesse de propagation de l'onde.

Dans ce cas, les surfaces d'onde forment des ondes dites *sphériques*, par opposition à l'onde plane, celle provoquée par un piston dans un tube par exemple.

Par définition, tous les points d'une surface d'onde vibrent en phase les uns par rapport aux autres. Si la vibration de la source est périodique, les surfaces d'onde séparées par une longueur d'onde les unes des autres vibrent en phase.

1.6 Ondes stationnaires

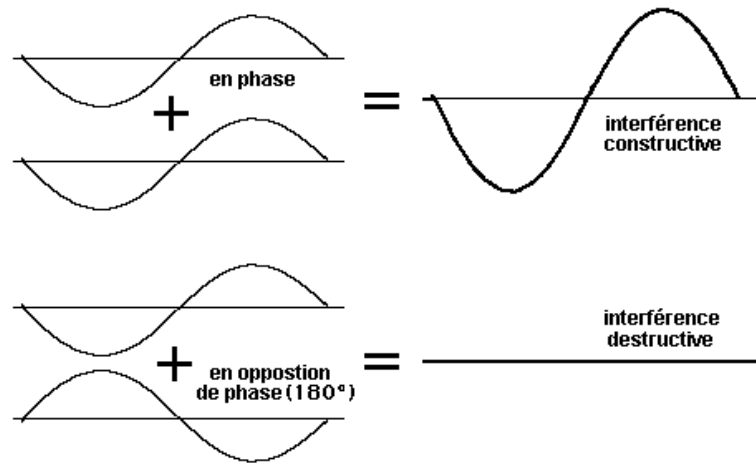
Les ondes stationnaires sont un phénomène physique important en acoustique musicale. Elles apparaissent dans la plupart des instruments de musique dès que ceux-ci rentrent en résonance.

1.6.1 Définitions

Train d'ondes : on a un train d'ondes lorsqu'une source émet des vibrations de façon entretenue, par opposition à une source qui n'émettrait qu'une impulsion à la fois.

Interférence : il y a interférence lorsque deux ou plusieurs trains d'ondes se propagent simultanément dans un milieu : chaque point du milieu se voit sollicité par toutes les ondes et son mouvement résulte de l'addition vectorielle de toutes les forces qui agissent sur lui.

Ci-dessous sont illustrés deux cas extrêmes d'interférences. Une interférence entre deux ondes de même fréquence peut être *constructive* si les ondes sont en phase, ou *destructive* si les ondes sont en opposition de phase.



1.6.2 Tuyau ouvert aux deux extrémités

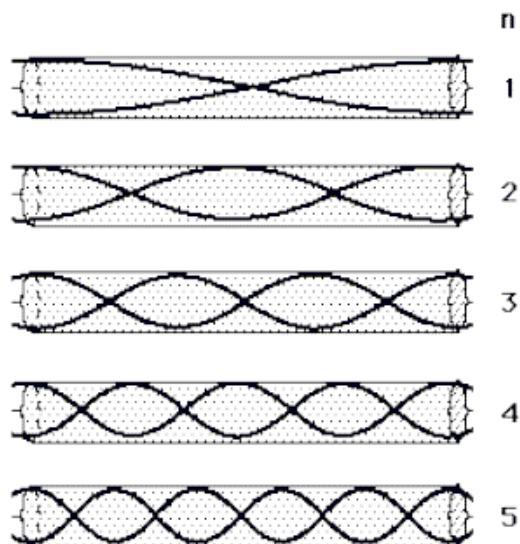
Dans le cas du tuyau, le milieu de propagation est l'air. Pour prendre un exemple en acoustique musicale, un tuyau ouvert aux deux extrémités correspondrait à la flûte traversière. La condition à remplir pour que l'onde stationnaire existe est que les deux extrémités doivent correspondre à des nœuds de pression.

Le premier régime de vibration possible est celui qui créerait dans le tuyau un ventre de pression au milieu, avec des nœuds aux deux extrémités, formant un fuseau.

Le raisonnement ci-dessous est identique si on considère l'*onde de déplacement* des particules au lieu de l'onde de pression : pour le premier mode, on a alors des ventres de déplacement aux deux extrémités et un nœud au milieu formant deux demi-fuseaux, comme illustré sur la figure ci-après représentant les cinq premiers modes de résonance d'un tuyau ouvert aux deux extrémités (les ondes de déplacement sont représentées sur la figure car les ondes de pression présenteraient des nœuds aux extrémités).

Pour le premier mode donc, la longueur du tuyau L doit donc correspondre à la distance entre deux nœuds consécutifs, qui vaut $\lambda/2$. Ceci peut s'écrire :

$$L = \frac{\lambda}{2} \quad \rightarrow \quad \lambda = 2L.$$



Comme

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

on obtient

$$f_1 = \frac{c}{2L}$$

C'est la fréquence la plus basse qui puisse s'établir, puisqu'une fréquence plus grave supposerait une longueur d'onde plus longue que le tuyau et ne pourrait satisfaire la condition énoncée plus haut, qui est de présenter un nœud de pression à chaque extrémité.

Par contre, des fréquences plus aiguës pourront aussi s'établir, qui sont toutes celles qui peuvent générer un nombre entier de fuseaux dans le tuyau, autrement dit, celles dont la demi-longueur d'onde peut être contenue un nombre entier de fois dans la longueur du tuyau :

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{2L}{n},$$

et l'on obtient la formule générale :

$$f_n = \frac{nc}{2L} \quad \text{où } n \text{ est un entier.}$$

L'ensemble de ces fréquences sont les modes propres du tuyau. Elles constituent théoriquement une *série harmonique*, c'est-à-dire que chacune des fréquences est un multiple entier de la première qu'on appelle généralement la *fondamentale*.

Exemple : Sachant que la vitesse du son dans l'air c est de 340 m/s, la fréquence fondamentale f_1 d'un tuyau d'une longueur $L = 34$ cm vaut

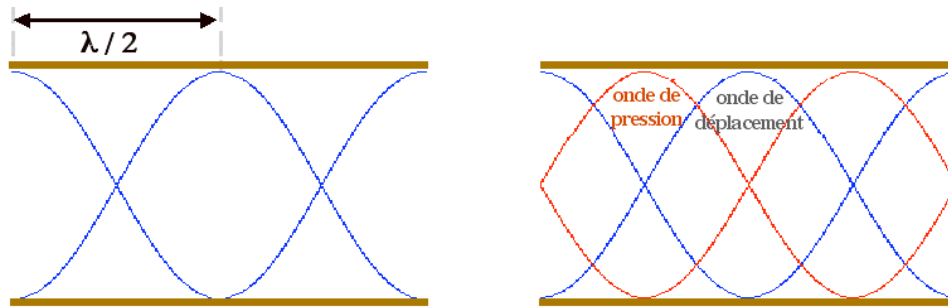
$$f_1 = \frac{c}{2L} = \frac{340}{2 \times 0,34} = 500 \text{ Hz.}$$

Si le diamètre du tuyau n'est pas négligeable par rapport à sa longueur, il faut veiller à considérer la *longueur effective* plutôt que la longueur réelle du tuyau, car dans ce cas, les nœuds de pression se trouvent pas exactement au niveau des extrémités ouvertes mais un peu plus loin à l'extérieur du tuyau. Une approximation de la longueur effective L' est donnée par

$$L' = L + 0.3 D$$

où L est la longueur réelle et D le diamètre du tuyau. (Il faut ajouter le terme $0.3 D$ pour chaque extrémité ouverte).

Remarque : L'onde de déplacement et l'onde de pression ne sont pas deux phénomènes distincts : elles sont deux manifestations simultanées du même phénomène. L'onde de pression et l'onde de déplacement sont en quadrature de phase, comme l'illustre la figure ci-dessous représentant le deuxième mode de résonance d'un tuyau ouvert aux deux extrémités. L'onde de pression et l'onde de déplacement sont en quadrature de phase.



1.6.3 Tuyau fermé à une extrémité et ouvert à l'autre

La clarinette peut être simplifiée à un tuyau fermé à une extrémité (à l'embouchure) et ouvert à l'autre (au pavillon). Pour que s'établisse un régime d'onde stationnaire dans un tel milieu, la condition doit être la génération d'un ventre de déplacement à l'extrémité ouverte et d'un nœud de déplacement à l'extrémité fermée. D'une façon générale, le tuyau ne pourra être subdivisé qu'en un nombre impair de demi-fuseaux, comme l'illustre la figure ci-après représentant les trois premiers modes de résonance (ondes de déplacement) d'un tuyau fermé à une extrémité (à gauche) et ouvert à l'autre (à droite).

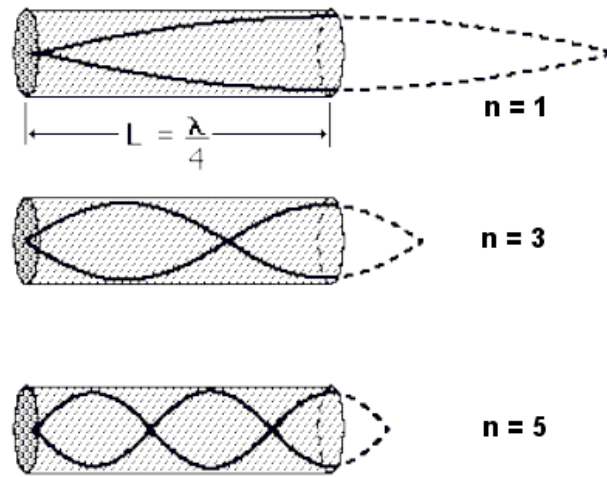
Déterminons la fréquence correspondant au premier mode de résonance (cf. haut de la Figure 1.6.3). On remarque que la longueur du tuyau correspond à un demi-fuseau, ce qui peut s'écrire :

$$L = \frac{\lambda}{4} \quad \rightarrow \quad \lambda = 4L$$

Ce qui donne pour la fréquence :

$$f_1 = \frac{c}{4L}$$

Remarquons que cette fréquence est la moitié de celle trouvée précédemment pour un tuyau ouvert aux deux extrémités.



Toutes les autres fréquences qui pourront s'établir dans un tel tuyau devront satisfaire la même condition. On voit tout de suite que les multiples entiers pairs de cette fondamentale ne le pourront pas puisque la longueur du tuyau équivaudrait à un nombre entier de demi-longueurs d'onde. *Seuls les multiples impairs* pourront établir des nombres impairs de demi-fuseaux. On obtient donc la formule générale :

$$f_n = \frac{(2n-1)c}{4L} \quad \text{où } n \text{ est un entier.}$$

Dans un tuyau de ce type, le mode 2 correspond à l'harmonique 3, le mode 3 à l'harmonique 5, etc.

$$\text{mode 1} \rightarrow f_1 = \frac{c}{4L}$$

$$\text{mode 2} \rightarrow f_3 = \frac{3c}{4L}$$

$$\text{mode 3} \rightarrow f_5 = \frac{5c}{4L}$$

$$\text{mode 4} \rightarrow f_7 = \frac{7c}{4L}$$

etc....