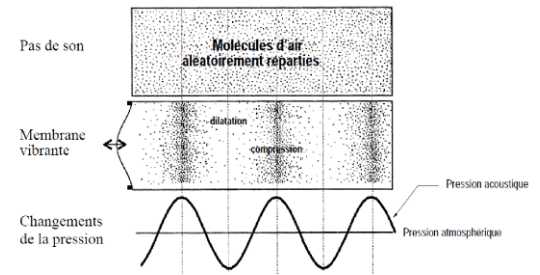


## PO1b : Propagation non dispersive : ondes acoustiques dans les fluides

### 1 Observations expérimentales

#### 1.1 ODG de célérité

- ★ Une onde acoustique ne se propage pas dans le vide.
- ★ Pour produire une onde acoustique, il faut une vibration mécanique (membrane d'un haut-parleur, choc entre deux solides, etc).
- Une onde acoustique est une **onde mécanique** qui ne peut évoluer que **dans un milieu matériel**. Sa propagation est associée aux perturbations du champ de pression et de vitesse.



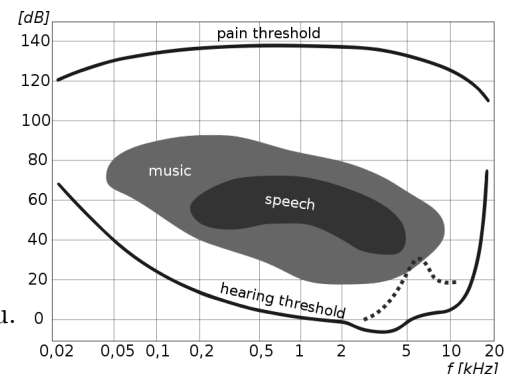
Milieu	Vitesse du son (m/s)	Milieu	Vitesse du son (m/s)
air (0 ° C)	331	dihydrogène (20 ° C)	1284
air (20 ° C)	343	eau (0 ° C)	1402
hélium (20 ° C)	965	eau (20 ° C)	1482

- ★ La célérité dans un milieu augmente avec la température.
- ★ Pour deux milieux de même compressibilité (gaz diatomique dilué par exemple), la célérité est plus grande dans le milieu moins dense.
- ★ Pour deux milieux de densité similaire, la célérité est plus grande dans le fluide le moins compressible (le plus rigide).

#### 1.2 Domaines de fréquences

On distingue en général trois domaines<sup>1</sup> de fréquence pour les ondes acoustiques :

- Les **infrasons** situés en dessous de 20 Hz : certains sont audibles par exemple par les éléphants et les baleines.
- La gamme audible par l'homme : **20 Hz à 20 kHz**, on parle alors « d'**onde sonore** ». Noter que ce domaine n'est pas défini de manière très précise et dépend en particulier de l'âge de l'individu.
- Les **ultrasons** situés au-dessus de 20 kHz. Par exemples certains sont audibles par les chats et les chiens.



#### 1.3 Applications des ondes acoustiques

En plus évidemment de l'audition (bruit, musique, parole), les ondes acoustiques dans les fluides interviennent aussi dans de nombreux domaines / applications dont :

- L'échographie<sup>2</sup> utilise des ultrasons de fréquence entre 5 et 7,5 MHz en obstétrique. L'image générée dépend principalement du coefficient de transmission des différents tissus. La résolution est de l'ordre du millimètre.
- Les sonars utilisés dans les bateaux ou les sous-marins utilisent des ultrasons de fréquence autour de 200 kHz pour les eaux de surface et de 50 kHz pour les eaux profondes.
- Les chauve-souris utilisent des ultrasons d'une fréquence d'environ 83 kHz pour éviter des obstacles et pour rechercher leurs proies.

## 2 Détermination de l'équation d'onde dans l'approximation acoustique

### 2.1 Modèle de l'approximation acoustique

• Hypothèse de fluide parfait (c'est-à-dire aucune dissipation). En particulier, les phénomènes de diffusion sont négligés. Donc pour un fluide parfait :  $\eta = 0$ , et l'écoulement est sans transfert thermique. De plus, on peut montrer que l'équation d'Euler est réversible. Ainsi, l'évolution d'une particule de fluide parfait est **isentropique**.

1. CE : Classifier les ondes acoustiques par domaines fréquentiels.

2. Cf chapitre PO3-Réflexion et transmission aux interfaces.

- Pesanteur négligée.
- Hypothèse de petite perturbation : « **approximation acoustique** ». On considère un fluide uniforme au repos en l'absence d'onde. On notera  $\mu_0$  et  $p_0$  les valeurs de masse volumique  $\mu$  et pression  $p$  du fluide à l'équilibre. Le champ de vitesse  $\vec{v}_0 = \vec{0}$  étant nul au repos. Lors du passage de l'onde, on notera :

$$\begin{cases} \mu(\vec{r}, t) &= \mu_0 + \mu_1(\vec{r}, t) \\ p(\vec{r}, t) &= p_0 + p_1(\vec{r}, t) \\ \vec{v}(\vec{r}, t) &= \vec{v}_0 + \vec{v}_1(\vec{r}, t) = \vec{v}_1(\vec{r}, t) \end{cases} \quad (1)$$

Où les perturbations  $\mu_1$ ,  $p_1$  et  $\vec{v}_1$  sont de valeur moyenne temporelle nulle.  $p_1(\vec{r}, t)$  est appelée « **surpression** (acoustique) ».

Hypothèse : **L'onde acoustique n'est qu'une petite perturbation du fluide par rapport à son repos** :

$$|\mu_1(\vec{r}, t)| \ll \mu_0, \quad \text{et} \quad |p_1(\vec{r}, t)| \ll p_0, \quad \text{et} \quad |\vec{v}_1| \ll c_{\text{son}} \quad (2)$$

ODG : Les ODG des perturbations  $p_1$ ,  $\mu_1$  et  $\vec{v}_1$  seront vus plus tard.

## 2.2 Les équations locales

prop : Les trois équations locales utiles :

- Conservation de la masse :  $\text{div}(\mu \vec{v}) + \frac{\partial \mu}{\partial t} = 0$
- Équation d'Euler :  $\mu \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\text{grad}(p)$
- Compressibilité isentropique :  $\chi_S = \frac{1}{\mu} \left. \frac{\partial \mu}{\partial p} \right|_S$

prop : L'onde étudiée présente 5 inconnues scalaires ( $\mu_1$ ,  $p_1$  et les trois composantes de  $\vec{v}_1$ ). Les deux équations de la mécanique { *conservation masse + Euler* } ne fournissent que 4 relations scalaires, insuffisant pour résoudre un système linéaire (et en plus ce système n'est même pas linéaire : termes  $\mu \vec{v}$  et  $(\vec{v} \cdot \text{grad}) \vec{v}$ ). Il faut une relation<sup>4</sup> supplémentaire, qui provient de la thermodynamique.

exo : Interpréter l'expression de  $\chi_S$ , justifier son signe, déterminer son unité. Démontrer qu'on a aussi  $\chi_S = -\frac{1}{V} \left. \frac{\partial V}{\partial p} \right|_S$  avec le volume  $V$ .

ODG : De l'ordre de  $10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$  dans un gaz et  $10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$  dans un liquide.

## 2.3 Équation d'onde pour la surpression

On commence par linéariser les équations locales puis on les combine pour obtenir<sup>5</sup> l'équation d'onde de surpression.

démo : Montrer qu'à l'ordre minimal (linéarisation), les trois équations précédentes deviennent :

$$\begin{cases} \mu_0 \text{div}(\vec{v}_1) + \frac{\partial \mu_1}{\partial t} = 0 & \text{(cons. masse linéarisée)} \\ \mu_0 \frac{\partial \vec{v}_1}{\partial t} = -\text{grad}(p_1) & \text{(eq. Euler linéarisée)} \\ \mu_1 = \mu_0 \chi_S p_1 & \text{(compressibilité linéarisée)} \end{cases} \quad (3)$$

À partir des équations linéarisées, démontrer l'équation d'onde pour la surpression dans le cas unidimensionnel

cartésien :  $\frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2} - \frac{1}{\mu_0 \chi_S} \frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} = 0$ .

3. Ne pas confondre le champ de vitesse (vitesse d'une particule mésoscopique de fluide) avec la célérité de l'onde, ni avec la vitesse d'une molécule.

4. CE : Écrire le système des trois équations locales utiles.

5. CE : Établir, par une approche eulérienne, l'équation de propagation de la surpression acoustique dans une situation unidimensionnelle en coordonnées cartésiennes. Utiliser l'opérateur laplacien pour généraliser l'équation d'onde.

prop : Dans l'approximation acoustique, la surpression acoustique  $p_1(\vec{r}, t)$  dans un fluide vérifie :

$$\frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2} - \frac{1}{\mu_0 \chi_S} \Delta p_1 = 0. \text{ C'est encore une « équation de d'Alembert ».}$$

## 2.4 Célérité, influence de la température dans le modèle du gaz parfait

prop : La célérité des ondes acoustiques dans les fluides est  $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \chi_S}}$ .

analogie : Dans les solides, on a trouvé  $c = \sqrt{\frac{E}{\mu}}$ . Comme la compressibilité est inverse à la raideur, on a encore  $c^2 = (\text{raideur})/(\text{inertie})$ .

ODG : cf tableau partie 1.1.

prop : Dans le modèle du gaz parfait, on trouve<sup>6</sup>  $c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$ . On obtient bien une célérité croissante<sup>7</sup> avec la température en  $\sqrt{T}$ .

démo : On note  $\gamma = C_p/C_V$  le coefficient adiabatique du gaz.

1. Rappeler la loi de Laplace qui relie  $p$  et  $V$  d'un gaz parfait lors d'une transformation isentropique.
2. En déduire que  $p\mu^{-\gamma} = \text{cte}$  puis que  $\chi_S = \frac{1}{\gamma p}$  pour un gaz parfait.
3. En déduire finalement que  $c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$ .
4. AN à température ambiante dans l'air ( $M = 29$  g/mol,  $\gamma = 1,4$ ).

## 3 Structure des ondes planes progressives harmoniques acoustiques dans les fluides

### 3.1 Onde longitudinale

prop : Une onde acoustique dans un fluide est **longitudinale** : la perturbation ondulatoire  $\vec{v}$  est colinéaire à la direction de propagation.

rq : Dans les solides, il existe des ondes mécaniques longitudinales (étudiées partie PO1a) mais aussi des ondes transverses (analogue à la vibration transverse d'une corde).

justification : En notant  $x$  la direction de propagation, la surpression ne dépend alors que de  $x$ . Alors, d'après l'équation d'Euler linéarisée, la vitesse de l'onde est uniquement portée par l'axe  $x$ .

### 3.2 Propagation non dispersive

prop : Comme c'est une équation de d'Alembert, la relation de dispersion est encore  $\omega^2 = c^2 k^2$ , soit  $k = \pm \omega/c$  pour une OPPH en  $e^{j(\omega t - kx)}$ .  $k = \omega/c$  correspond à propagation selon  $+\vec{u}_x$ ,  $k = -\omega/c$  correspond à propagation selon  $-\vec{u}_x$ .

démo : Injecter OPPH.

### 3.3 Relation entre surpression et vitesse : impédance acoustique

On a trouvé deux relations plutôt symétriques où les rôles de  $p_1$  et  $\vec{v}_1$  sont inversés :

$$-\text{grad}(p_1) = \mu_0 \frac{\partial \vec{v}_1}{\partial t} \quad (4)$$

$$\mu_0 \text{div}(\vec{v}_1) = -\mu_0 \chi_S \frac{\partial p_1}{\partial t} \quad (5)$$

Une variation spatiale d'une grandeur entraîne une variation temporelle de l'autre, et réciproquement.

def : On dit que les grandeur  $p_1$  et  $\vec{v}_1$  de l'onde sont **couplées**.

6. CE : Exprimer la célérité des ondes acoustiques en fonction de la température pour un gaz parfait.

7. On retrouve rapidement ce résultat si on sait que  $\chi_S$  dépend peu de  $T$  à  $p$  constante et que  $\mu_0 \propto 1/T$  (relation gaz parfait).

prop : **Toute propagation d'onde fait intervenir un couple de grandeurs couplées.** Par exemple :

\* onde acoustique dans fluides :  $p$  et  $\vec{v}$ ,

\* onde acoustique dans solides : déplacement longitudinal  $\xi$  et force de rappel  $\vec{F}$ ,

\* onde transverse d'une corde : déplacement transverse  $y$  et force  $\vec{T}$ ,

\* onde électromagnétique :  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$ .

def : La manière dont une onde se propage dans un milieu est alors caractérisée par le rapport entre ces deux grandeurs couplées, appelé « impédance d'onde ». Dans le cas de l'onde acoustique dans les fluides, on définit l'**impédance acoustique** :

$$Z \stackrel{\text{def}}{=} \left| \frac{p_1}{v_1} \right| \quad (6)$$

prop : Dans l'approximation acoustique, on obtient :  $p_1 = Zv_1$  si propagation selon  $x$  croissant, et  $p_1 = -Zv_1$  si

propagation selon  $x$  décroissant avec  $Z = \mu_0 c = \sqrt{\frac{\mu_0}{\chi_S}}$

ODG :  $Z(\text{air}) = 5.10^2 \text{ Pa.s.m}^{-1} \ll Z(\text{eau}) = 1,4.10^6 \text{ Pa.s.m}^{-1}$ . Ainsi, dans l'eau, il faut une surpression<sup>8</sup> bien plus forte que dans l'air pour obtenir la même vitesse  $v_1$ .

rq : La variation d'impédance acoustique à l'interface entre milieux différents explique le phénomène de réflexion partielle, cf chapitre *PO3 : Réflexion et transmission aux interfaces*.

démo : Utiliser la notation réelle ou complexe dans une relation reliant  $p_1$  et  $\vec{v}_1$  pour obtenir  $p_1 = \mu_0 c v_1$  si propagation selon  $x$  croissant et  $p_1 = -\mu_0 c v_1$  si propagation selon  $x$  décroissant.

## 4 Aspects énergétiques des ondes acoustiques

### 4.1 Densité volumique d'énergie acoustique

def : La **densité volumique d'énergie acoustique**  $e$  est telle que l'énergie totale de l'onde dans un volume  $V$  est :  $\mathcal{E} = \iiint_V e \cdot dV$ .

prop admise : La densité volumique d'énergie acoustique vaut :  $e = \frac{\mu_0 v_1^2}{2} + \frac{\chi_S p_1^2}{2}$ . unité :  $\text{J.m}^{-3}$ .

rq : Le carré d'un infiniment petit d'ordre 1 est un infiniment petit d'ordre 2.

interprétation : Interpréter les deux termes de l'expression.

analogie : Électromagnétisme :  $u = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0}$ .

### 4.2 Vecteur densité de courant d'énergie acoustique

def : Le **vecteur densité de courant d'énergie acoustique**  $\vec{\Pi}_a$  est défini tel que son flux à travers une surface donne la puissance transmise :  $\mathcal{P} = \iint_S \vec{\Pi}_a \cdot d\vec{S}$ . unité :  $\text{W.m}^{-2}$ .

prop admise : Son expression est  $\vec{\Pi}_a = p_1 \vec{v}_1$ .

rq1 : C'est le produit de deux infiniment petits d'ordre 1, il est donc un infiniment petit d'ordre 2.

rq2 : Le produit de deux grandeurs de moyenne nulle n'est pas forcément nul (penser à  $\langle \cos^2(\omega t) \rangle = 1/2$ ).

analogie : Électromagnétisme : vecteur de Poynting  $\vec{\Pi} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0}$ .

prop : Conservation<sup>9</sup> de l'énergie acoustique :  $\text{div}(\vec{\Pi}_a) + \frac{\partial e}{\partial t} = 0$  en absence de source.

### 4.3 Cas d'une onde plane progressive harmonique

Pour une OPPH, on peut démontrer<sup>10</sup> les expressions de  $e$  et  $\vec{\Pi}$ . On considère une onde acoustique plane progressive acoustique se propageant suivant  $+\vec{u}_x$ . On a donc :

$$p_1(x, t) = p_{1m} \cos(\omega t - kx), \quad \vec{v}_1(x, t) = v_1(x, t) \vec{u}_x = v_{1m} \cos(\omega t - kx) \vec{u}_x \quad (7)$$

8. CE : Exploiter la notion d'impédance acoustique pour faire le lien entre les champs de surpression et de vitesse d'une onde plane progressive harmonique.

9. Démo pas au programme mais accessible en exercice si on donne  $\text{div}(f\vec{u}) = f\text{div}(\vec{u}) + \vec{u} \cdot \text{grad}(f)$ .

10. CE : Utiliser les expressions admises du vecteur densité de courant énergétique et de la densité volumique d'énergie associés à la propagation de l'onde.

où  $p_{1m}$  est l'amplitude de la surpression  $p_1(x, t)$  et  $v_{1m}$  est l'amplitude de la vitesse.

exo de cours : On rappelle  $p_1 = \mu_0 c v_1$  pour une OPPH se propageant selon  $+\vec{u}_x$ .

1. Montrer que les deux termes de l'énergie volumique  $e(x, t)$  ont la même moyenne temporelle. En déduire :

$$\langle e(x, t) \rangle = \frac{\mu_0}{2} v_{1m}^2 \tag{8}$$

2. Montrer que la valeur moyenne temporelle du vecteur densité de courant d'énergie vaut :

$$\langle \vec{\Pi}_a(x, t) \rangle = \frac{1}{2} \mu_0 c v_{1m}^2 \vec{e}_x = \langle e(x, t) \rangle \cdot c \cdot \vec{u}_x \tag{9}$$

3. Interpréter cette expression en exprimant de deux manières la puissance transmise à travers une surface  $dS$ .

### 4.4 Intensité acoustique

def : L'intensité acoustique  $I$  est la puissance acoustique moyenne transmise par unité de surface :  $I = \left\| \langle \vec{\Pi} \rangle \right\|$ .

prop : Dans l'approximation acoustique, l'exo précédent donne :

$$I = \left\| \langle \vec{\Pi} \rangle \right\| = \frac{1}{2} \mu_0 c v_{1m}^2 = \frac{1}{2} \frac{p_{1m}^2}{\mu_0 c} \tag{10}$$

ODG : Le seuil minimal d'audition se situe environ vers  $I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$ . Le seuil de douleur se situe environ vers  $I_{\text{max}} = 1 \text{ W.m}^{-2}$ .

rq : On trouve que l'intensité acoustique est proportionnelle au carré de l'amplitude de surpression (ou vitesse).

prop : Même à la limite du seuil de douleur de l'oreille, l'approximation acoustique est bien vérifiée<sup>11</sup> car  $p_{1m} \ll p_0 = 1 \text{ bar}$ . On trouve aussi  $v_{1m} \ll c_{\text{son}}$ .

Ordres de grandeur de bruits typiques

Conversation	Sensation auditive	Niveau sonore dB(A)	Exemples
Voix chuchotée	Seuil d'audibilité	0	Laboratoire d'acoustique
	Très calme	10	Studio d'enregistrement, cabine de prise de son
		15	Feuilles légères agitées par vent doux dans jardin silencieux
	Calme	20	Studio de radio; jardin tranquille
40		Bureau tranquille dans quartier calme; appartement normal	
Voix normale	Courant	50	Restaurant tranquille; rue très tranquille
		60	Conversation normale; musique de chambre; rue résidentielle
		65	Appartement bruyant
Voix élevée	Bruyant mais supportable	70	Restaurant bruyant; circulation importante
		75	Atelier dactylo; usine moyenne
Voix très forte	Pénible	85	Radio très puissante; atelier de tournage et d'ajustage; circulation intense
Voix criée	Peu supportable	90	Atelier de forgeage; trafic très intense
Voix extrême	Insupportable	100	Scie circulaire ou à ruban; presse à découper de moyenne puissance; marteau-piqueur à moins de 5 m
		110	Atelier de chaudronnerie; rivetage à 10 m
Impossible	Seuil de douleur	120	Banc d'essais de moteurs; bruit d'avion au décollage
		130	Marteau-pilon
		140	Turboréacteur au banc d'essais

démo : Calculer les amplitudes de surpression et vitesse correspondant au seuil d'audition et au seuil de douleur. Justifier la validité de l'approximation acoustique. Réponse :

	$v_{1m}$ (m/s)	$p_{1m}$ (Pa)
$I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$	$6,9 \cdot 10^{-8}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$
$I_{\text{max}} = 1 \text{ W.m}^{-2}$	$6,9 \cdot 10^{-2}$	29

def : La gamme d'intensité détectable par l'oreille s'étale sur un rapport de  $10^{12}$ ! On utilise donc en générale une échelle logarithmique. L'intensité acoustique en décibels<sup>12</sup>  $I_{dB}$  est définie par :

$$I_{dB} = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) \tag{11}$$

- ★ Le seuil d'audition  $I = I_0$  correspond donc à  $I_{dB} = 0$ .
- ★ Le seuil de douleur  $I = I_{\text{max}}$  correspond donc à  $I_{dB} = 120$ .
- ★ Doubler l'intensité sonore revient à augmenter  $I_{dB}$  de +3 dB (car  $10 \log(2) \simeq 3,01$ ).

### 4.5 Applications

1. Deux pétards explosent en même temps et produisent une intensité sonore de 90 dB. Quelle est l'intensité sonore si un seul explose ?
2. Si l'amplitude de surpression d'une onde sonore est triplée, de combien l'intensité sonore augmente-t-elle en dB ?

11. CE : Valider l'approximation acoustique.

12. CE : Citer quelques ordres de grandeur de niveaux d'intensité sonore.

3. On donne le lien entre intensité sonore et amplitude  $v_m$  de vitesse  $I = \mu_0 c (v_m)^2 / 2$  et le seuil minimal d'audition  $I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$ . Quelle est l'intensité sonore en dB d'une onde se propageant dans l'air pour laquelle l'amplitude de déplacement du fluide est de 0,1 mm à fréquence de 180 Hz ?

#### 4.6 Atténuation d'une onde sphérique

def : L'**atténuation** d'une onde est la décroissance de son amplitude au cours de la propagation. En l'absence de dissipation (absorption), elle peut être due à l'étalement de l'onde sur un front d'onde de plus en plus grand.

prop : La conservation de l'énergie implique que l'intensité d'une onde sphérique s'atténue en  $r^{-2}$ . La surpression d'une onde sphérique s'atténue<sup>13</sup> en  $r^{-1}$ .

analogie : Intensité lumineuse en  $r^{-2}$ , Amplitude de  $\vec{E}$  ou  $\vec{B}$  en  $r^{-1}$ .

justification rapide : Par conservation du flux de  $\vec{\Pi}$ , justifier que l'intensité acoustique d'une onde sphérique s'atténue en  $r^{-2}$ . En déduire qualitativement que la surpression s'atténue en  $r^{-1}$ .

exo plus précis : On considère une onde acoustique sphérique créée par une source au centre du repère. Pour une fonction  $f(r)$  ne dépendant que de la coordonnée sphérique  $r$ , on donne le gradient  $\vec{\text{grad}}(f) = \frac{\partial f}{\partial r} \vec{e}_r$  et le laplacien

$$\Delta f = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 (rf)}{\partial r^2}.$$

1. À partir de l'équation de d'Alembert tridimensionnelle, en déduire :  $\frac{\partial^2 (rp_1)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 (rp_1)}{\partial r^2}$ .
2. En déduire que la solution en onde progressive divergente est du type  $p_1(r, t) = \frac{A}{r} \cos(\omega t - kr + \varphi)$ , donc bien d'amplitude en  $1/r$ .
3. À partir de l'équation d'Euler linéarisée, en déduire le champ des vitesses :

$$\vec{v}_1(r, t) = \left( \frac{A}{\mu_0 \omega r^2} \sin(\omega t - kr + \varphi) + \frac{kA}{\mu_0 \omega r} \cos(\omega t - kr + \varphi) \right) \vec{e}_r \quad (12)$$

4. En déduire que le vecteur densité de courant moyen  $\langle \vec{\Pi}_a \rangle = \langle p_1 \vec{v}_1 \rangle$  décroît en  $1/r^2$ .

## 5 Complément : onde stationnaire dans un tuyau, instrument à vent

La cavité de certains instruments à vent peut être modélisée par un tuyau symétrique (ouvert aux deux extrémités), ou par un tuyau mixte (ouvert d'un seul côté) où s'établissent des ondes stationnaires.

conditions aux limites : En une extrémité ouverte à pression atmosphérique, on a un nœud de surpression (car pression constante) et un ventre de vitesse. En une extrémité fermée rigide, on a un ventre de surpression et un nœud de vitesse (le fluide ne pénètre pas dans la paroi).

quantification de  $\lambda$  :

★ tuyau symétrique : Comme pour la corde,  $L = n \cdot \frac{\lambda}{2}$ . ex : flûte.

Paramètre	Tuyau ouvert	Tuyau fermé à une extrémité
Pression		
Vitesse		

★ tuyau mixte : Déterminer la relation entre  $\lambda$  et  $L$ . ex : clarinette.

13. CE : Utiliser une expression fournie de la surpression pour interpréter par un argument énergétique la décroissance en  $1/r$  de l'amplitude.