Physique des instruments à vents

E. Kierlik

Licence de sciences et technologie de l'UPMC

15 mai 2007

Quelques instruments à vents

La famille des bois

Certains n'ont de bois que le nom !

Quelques instruments à vents

La famille des bois

Certains n'ont de bois que le nom !

Un premier classement

- flûtes.
- instruments à anche.
- instruments à anche double.

Quelques instruments à vents

La famille des bois

Certains n'ont de bois que le nom !

Un premier classement

- flûtes.
- instruments à anche.
- instruments à anche double.

Une assez grande variété de matériaux, de dimensions, d'embouchures, de clefs, . . . mais ils sont tous construits autour d'un tuyau !

Des déclinaisons variées

Les clarinettes

Les saxophones

Les plus communs pour le jazz : soprano (S. Bechet), alto (C. Parker), ténor (J. Coltrane) et baryton (G. Mulligan).

Plan du cours

I Les lois des tuyaux

- L'équation de propagation, les conditions aux limites.
- Les tuyaux cylindriques.
- Les tuyaux coniques.

Plan du cours

I Les lois des tuyaux

- L'équation de propagation, les conditions aux limites.
- Les tuyaux cylindriques.
- Les tuyaux coniques.

II Son de biseau et son d'anche

- le biseau simple
- couplage avec le tuyau sonore (difficile !)
- l'anche

Plan du cours

I Les lois des tuyaux

- L'équation de propagation, les conditions aux limites.
- Les tuyaux cylindriques.
- Les tuyaux coniques.

II Son de biseau et son d'anche

- le biseau simple
- couplage avec le tuyau sonore (difficile !)
- l'anche

III Flûte, saxophone, clarinette

- Quels tuyaux ? quelles sources ?
- Changer de note.
- Changer de registre.

Quelles équations ?

- Les équations de l'acoustique linéaire :

$$\begin{aligned}\frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial x}\\ \frac{\partial v}{\partial x} &= -\chi_S\frac{\partial p}{\partial t}\end{aligned}$$

- L'équation d'onde :

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}(= \Delta p)$$

avec c la vitesse du son $c = \sqrt{\frac{1}{\rho_0\chi_S}}$.

Quelles équations ?

- Les équations de l'acoustique linéaire :

$$\begin{aligned}\frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial x}\\ \frac{\partial v}{\partial x} &= -\chi_S\frac{\partial p}{\partial t}\end{aligned}$$

- L'équation d'onde :

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}(= \Delta p)$$

avec c la vitesse du son $c = \sqrt{\frac{1}{\rho_0 \chi_S}}$.

Quelles conditions aux limites ?

- à une paroi : $\vec{v}(\vec{r}, t) = \vec{0}\ \forall t$. (noeud de vitesse)
- à une surface libre : $p(\vec{r}, t) = 0\ \forall t$. (noeud de pression)

Les tuyaux

Quelles équations ?

- Les équations de l'acoustique linéaire :

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} &= -\chi_S \frac{\partial p}{\partial t} \end{aligned}$$

- L'équation d'onde :

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} (= \Delta p)$$

avec c la vitesse du son $c = \sqrt{\frac{1}{\rho_0 \chi_S}}$.

Quelles conditions aux limites ?

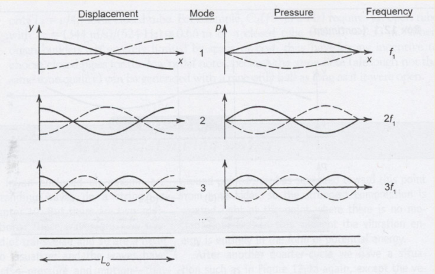
- à une paroi : $\vec{v}(\vec{r}, t) = \vec{0}\ \forall t$. (noeud de vitesse)
- à une surface libre : $p(\vec{r}, t) = 0\ \forall t$. (noeud de pression)

Quelle méthode ?

Recherche de solutions harmoniques :

$$\begin{aligned} p(\vec{r}, t) &= p(\vec{r}) \exp(j2\pi\nu t) \\ \vec{v}(\vec{r}, t) &= \vec{v}(\vec{r}) \exp(j2\pi\nu t) \end{aligned}$$

Les tuyaux ouverts

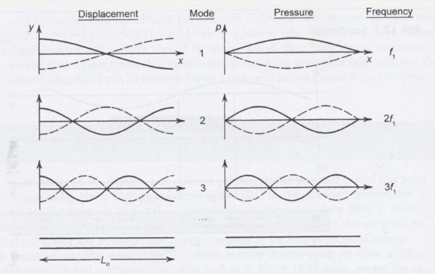


$p(x) = p_0 \sin(2\pi \frac{x}{\lambda_n})$ avec

$\lambda_n = \frac{2L_0}{n}$ et $\nu_n = n\frac{c}{2L_0}$.

Les tuyaux cylindriques

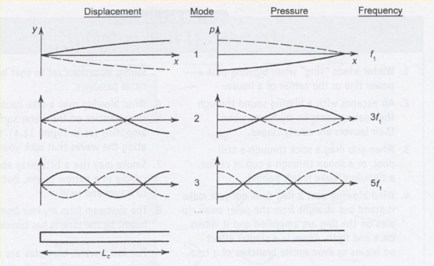
Les tuyaux ouverts



$$p(x) = p_0 \sin(2\pi \frac{x}{\lambda_n}) \text{ avec}$$

$$\lambda_n = \frac{2L_0}{n} \text{ et } \nu_n = n\frac{c}{2L_0}.$$

Les tuyaux fermés



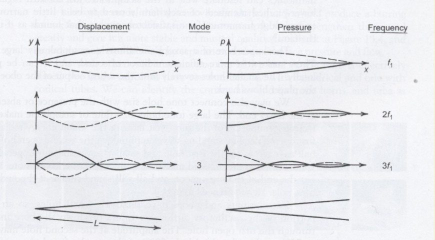
$$p(x) = p_0 \cos(2\pi \frac{x}{\lambda_{2p-1}}) \text{ avec}$$

$$\lambda_{2p-1} = \frac{4L_c}{(2p-1)} \text{ et}$$

$$\nu_{2p-1} = (2p-1)\frac{c}{4L_c} \; (p \geq 1).$$

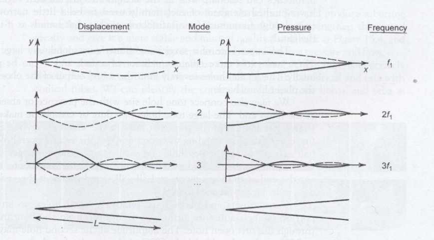
Les tuyaux coniques

Les modes propres d'un tuyau conique



On retrouve les modes pairs (→ un son plus riche en harmonique).

Les modes propres d'un tuyau conique



On retrouve les modes pairs ($\rightarrow$ un son plus riche en harmonique).

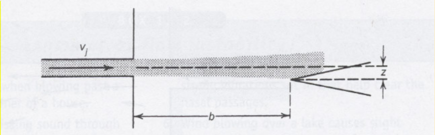
Pourquoi ?

- L'équation d'onde :
$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{1}{r}\frac{\partial^2 [rp]}{\partial r^2}$$
- La solution harmonique :
$$-\frac{\omega^2}{c^2} rp(r) = \frac{d^2[rp(r))]}{dr^2}$$
$$rp(r) = A\cos(kr) + B\sin(kr)$$
(où $k = \frac{\omega}{c}$).
- La condition au limite $p(r = L) = 0$ et $p(r = 0)$ finie.

Le son du biseau (I)

Montage expérimental

Un jet d'air vient frapper le coin d'un biseau.

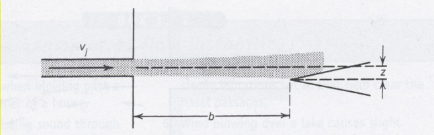


Cas de l'orgue (cf. la lumière et la lèvre supérieure), de la flûte, ...
Paramètres : la vitesse de l'écoulement v_j, la distance biseau/lumière b, l'asymétrie z.

Le son du biseau (I)

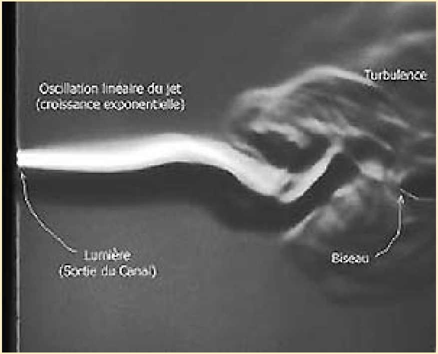
Montage expérimental

Un jet d'air vient frapper le coin d'un biseau.



Cas de l'orgue (cf. la lumière et la lèvre supérieure), de la flûte, ...
Paramètres : la vitesse de l'écoulement v_j, la distance biseau/lumière b, l'asymétrie z.

Quel résultat ?

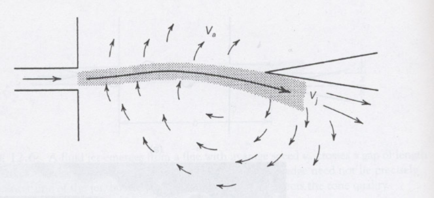


$\longrightarrow$ naissance d'instabilités aérodynamiques *devant* le biseau.

Le son du biseau (II)

L'écoulement acoustique » vient déplacer le jet d'air.
Différents modes, de l'hystérésis.

Interprétation

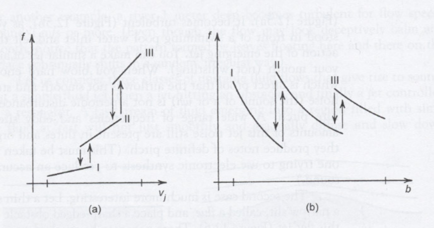


En régime harmonique :

$$(2p-1)\frac{T_p}{2} = (2p-1)\frac{1}{2\nu_p} = \frac{b}{\alpha v_j}$$

(expérimentalement $\alpha \sim 0.4$).

Le son du biseau isolé



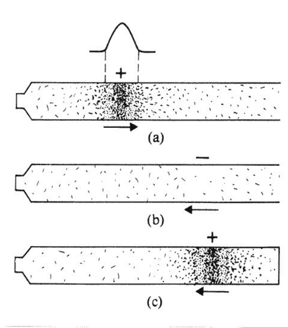
$$\nu_p = \frac{\alpha}{2(2p-1)}\frac{v_j}{b}.$$

A.N. : $b = 1$ cm et $v_j = 10$ m.s^{-1}
$\rightarrow \nu_1 \sim 200$ Hz.

Le son du biseau (III)

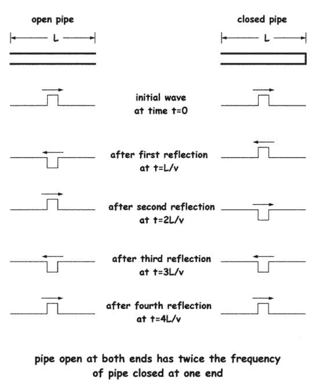
Couplage avec un tuyau (ouvert ou fermé) : le déplacement de la lame d'air génère une impulsion acoustique dans le tuyau. Que devient-elle ?

Réflexion de l'impulsion



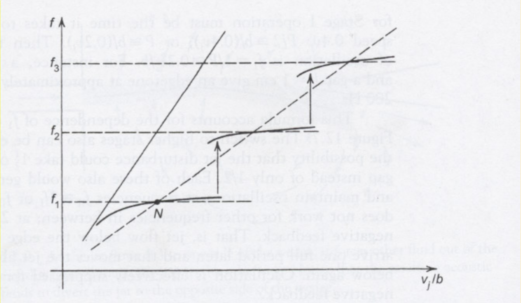
Reflection of a sound pulse in a pipe:
(a) incident pulse; (b) reflection from an open end;
(c) reflection from a closed end

Allers et retours



Dans de bonnes conditions, le tuyau impose sa fréquence à la lame d'air !

Le son du biseau associé à un résonateur

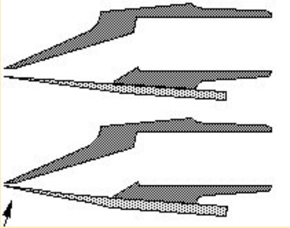


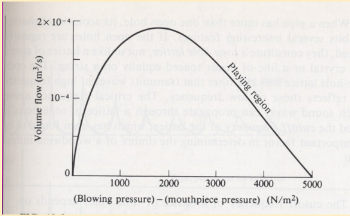
Droite en trait plein : mode (I) du biseau isolé ; traits horizontaux : fréquences propres du tuyau isolé ; segments en traits pleins : son de l'ensemble en fonction du paramètre $\frac{v_j}{b}$.

La résonance est élevée lorque la traversée de la bouche est égale à un quart de période (droite pointillée).

Et l'anche ?

De l'anche à l'impédance

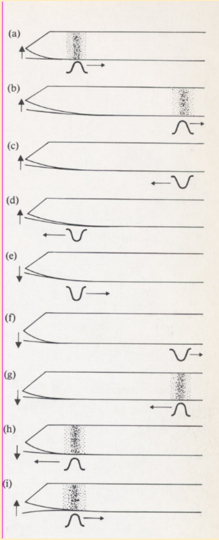




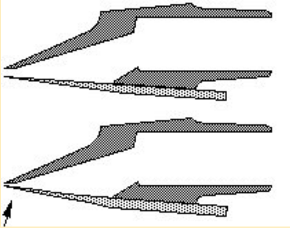
L'anche a une impédance (cf. résistance) négative comme la diode à effet tunnel $\longrightarrow$ possibilités d'oscillations autoentretenues.

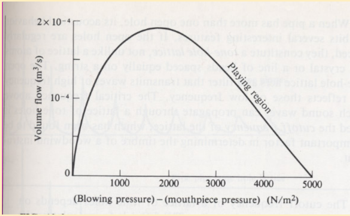
Et l'anche ?

L'auto-entretien



De l'anche à l'impédance

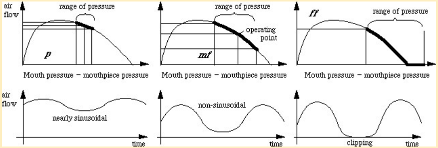




L'anche a une impédance (cf. résistance) négative comme la diode à effet tunnel → possibilités d'oscillations autoentretenues.

Effets non linéaires

Par variation d'amplitude

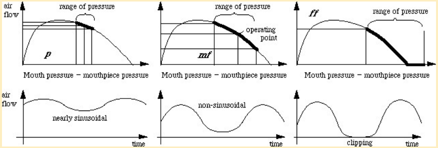


Lorsque l'amplitude de la variation de la pression entre la bouche et le bec augmente, la relation entre le flux d'air et la pression devient de moins en moins linéaire

$\longrightarrow$ plus d'harmoniques donc son plus brillant.

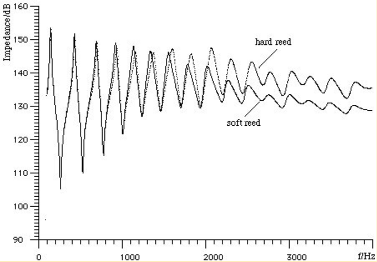
Effets non linéaires

Par variation d'amplitude



Lorsque l'amplitude de la variation de la pression entre la bouche et le bec augmente, la relation entre le flux d'air et la pression devient de moins en moins linéaire → plus d'harmoniques donc son plus brillant.

Par souplesse de l'anche

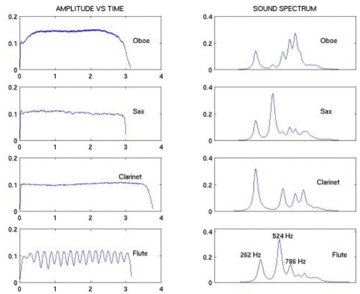


Impédance au niveau du bec de la note fondamentale d'une clarinette pour une anche souple et une anche dure : les résonances dans l'aïgu sont modifiées → une anche souple vibre plus facilement à haute fréquence (atténue les résonances) et modifie le volume effectif du bec (déplace la résonance).

Les sons des bois

Flûte, clarinette, hauboits, saxophone : pourquoi une telle richesse de timbre pour des instruments construits autour d'un tube ?

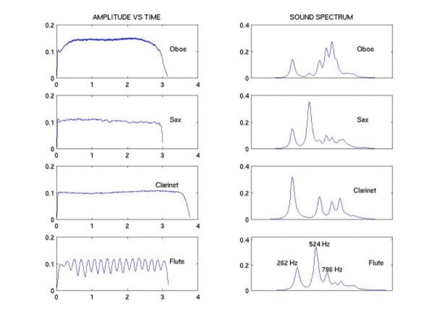
Spectre sonore



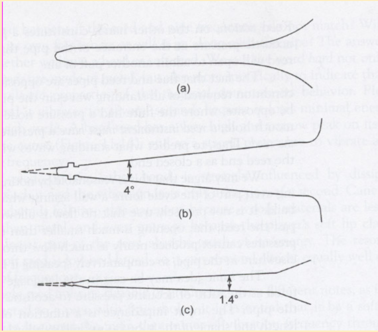
Les sons des bois

Flûte, clarinette, hauboits, saxophone : pourquoi une telle richesse de timbre pour des instruments construits autour d'un tube ?

Spectre sonore



Des tubes et des embouchures forts différents

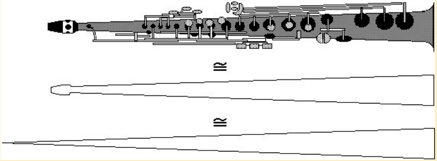


Clarinette et saxophone

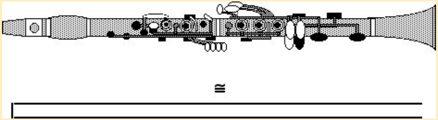
Comment les modéliser ?

Schémas

Le saxophone : un cône ?



La clarinette : un cylindre fermé ?

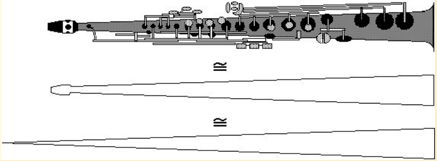


Clarinette et saxophone

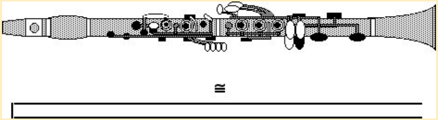
Comment les modéliser ?

Schémas

Le saxophone : un cône ?



La clarinette : un cylindre fermé ?



Différences sonores

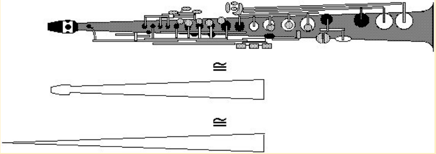
- tube semi-fermé/ tube ouvert : un octave d'écart pour une longueur donnée.
- Absence des harmoniques pairs : son « creu »de la clarinette.
- Octave (12 demi-tons) ou intervalle de douzième (19 demi-tons) : quels doigtés ?

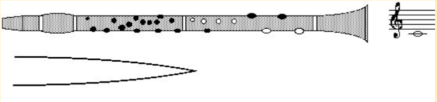
Changer de note (I)

Pour changer de note et monter dans les aïgus, il faut réduire la longueur effective du tube : rôle des percées (trous).

Première idée

Au niveau d'une percée, la pression acoustique est nulle → déplacement du noeud de pression.



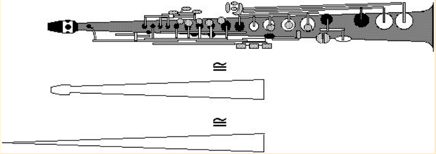


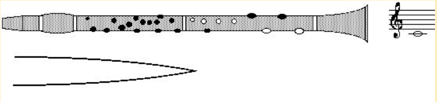
Changer de note (I)

Pour changer de note et monter dans les aïgus, il faut réduire la longueur effective du tube : rôle des percées (trous).

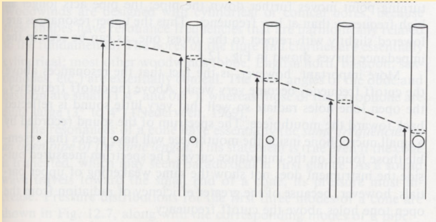
Première idée

Au niveau d'une percée, la pression acoustique est nulle $\rightarrow$ déplacement du noeud de pression.





hélas insuffisante !



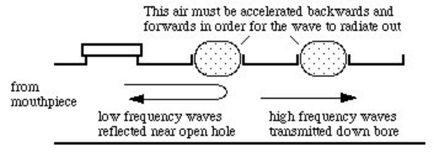
Plus la percée est petite, plus l'onde stationnaire s'étend au delà du trou.

Changer de note (II)

Les percées successives modifient profondément le comportement de l'onde stationnaire en fonction de la fréquence.

Très insuffisante !

L'inertie de la masse d'air du trou est très élevée à hautes fréquences : ces dernières ne sont pas arretées par la percée !



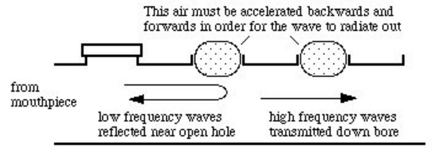
Au contraire, les basses fréquences sont rayonnées efficacement et très atténuées.

Changer de note (II)

Les percées successives modifient profondément le comportement de l'onde stationnaire en fonction de la fréquence.

Très insuffisante !

L'inertie de la masse d'air du trou est très élevée à hautes fréquences : ces dernières ne sont pas arretées par la percée !



Au contraire, les basses fréquences sont rayonnées efficacement et très atténuées.

La fréquence de coupure