

# Fonctionnement des instruments à vent

1<sup>ère</sup> partie : le résonateur

Jean-Pierre Dalmont

# Instruments à vent : une classification

## *Mécanismes excitateurs*

*Résonateur fort /  
Excitateur asservi*

### Jet oscillant

(flûtes)

Flûtes  
(traversière, à bec,  
à encoches, etc)

*Résonateur faible /  
Excitateur maître*

Sons de biseau  
(sifflets)

### Effet valve

(instruments à anche)

Anches  
(clarinette, hautbois,  
saxophone, basson)

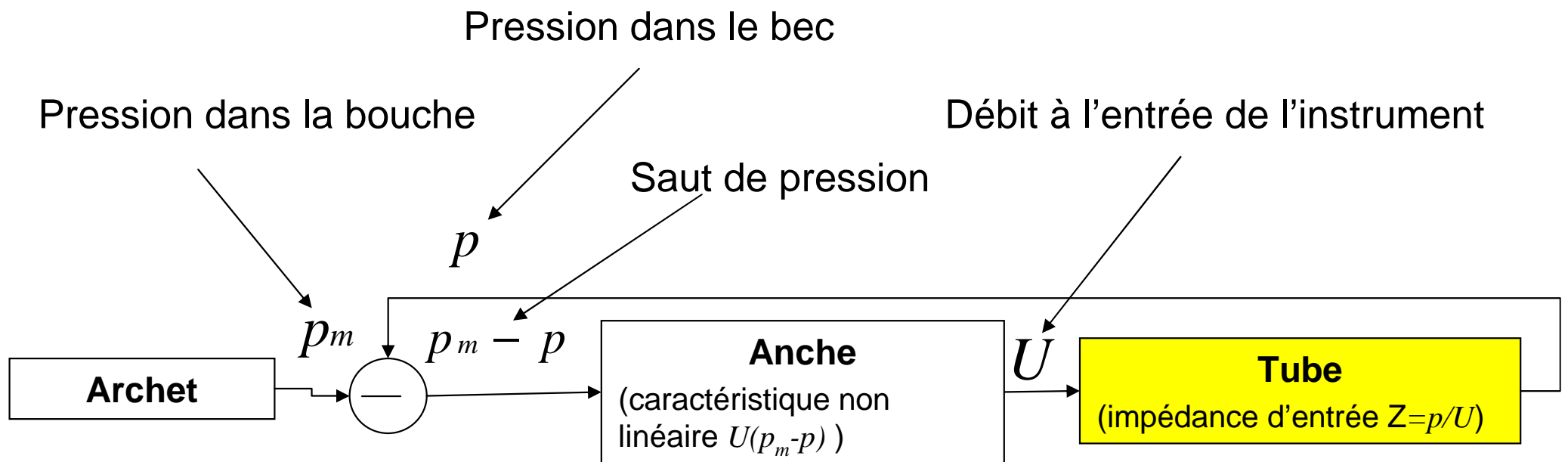
Cuivres  
(trompette, cor, etc)

Anches libres  
(harmonica, accordéon)  
Voix

# Introduction

## Le mécanisme de l'auto oscillation : cas des instruments à anche

- La source d'énergie est l'air insufflé (caractérisé par la pression  $P_m$ )
- Le système excitateur est la valve constituée par le système anche bec (caractéristique pression-débit)
- Le résonateur est le tube (impédance d'entrée)



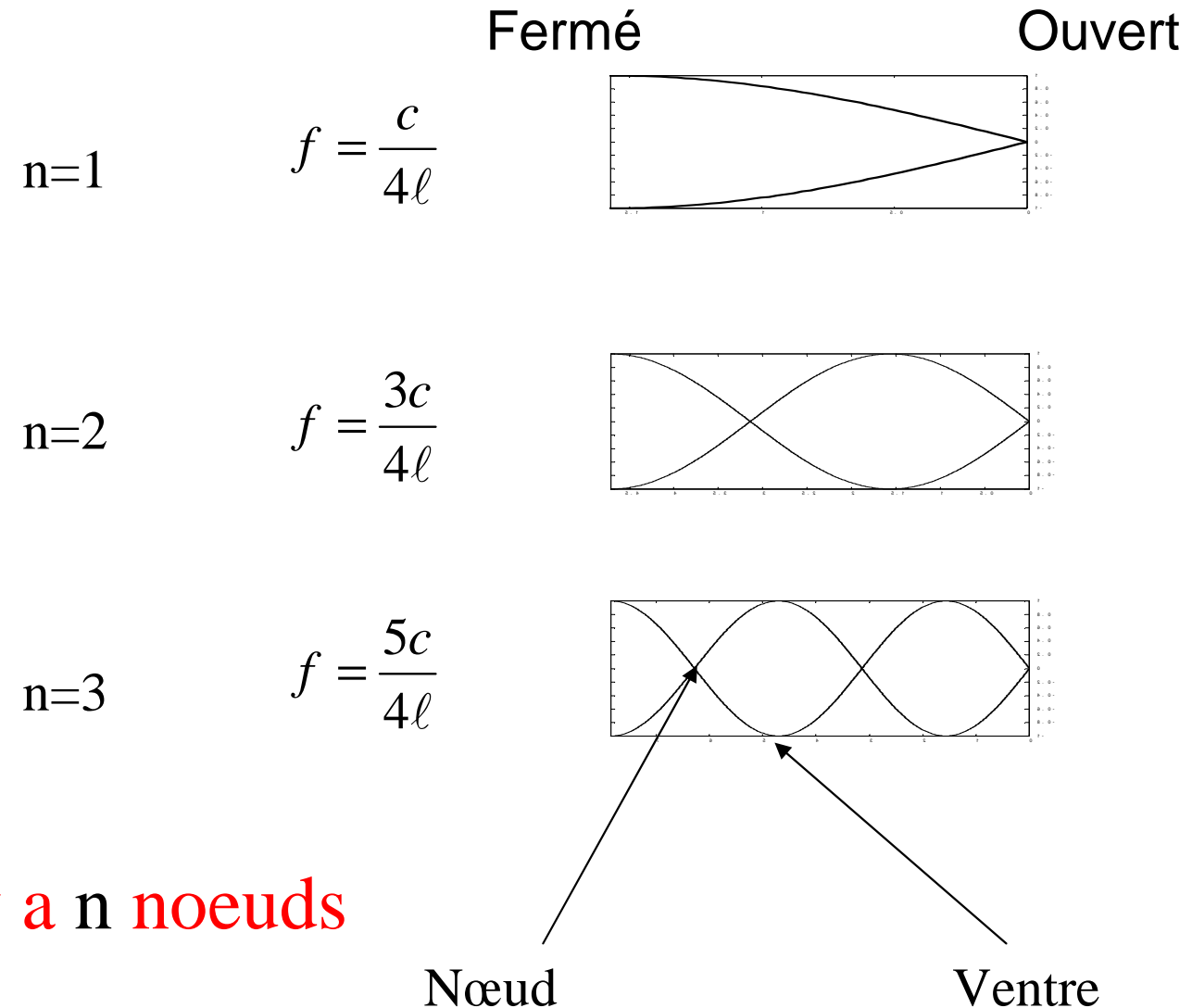
## 1.2 Le résonateur : le cylindre

### Le tuyau sonore

- Le tuyau sonore cylindrique idéal (section uniforme, sans dissipation) encastré est un résonateur harmonique.
  - Ouvert-ouvert les fréquence propres sont  $f_n = n \frac{c}{2L}$
  - Fermé-fermé les fréquence propres sont  $f_n = (2n - 1) \frac{c}{4L}$
  - Fermé-ouvert les fréquence propres sont  $f_n = (2n - 1) \frac{c}{4L}$
  - Le cylindre ouvert-ouvert correspond (*grosso-modo*) au cas de la flûte traversière moderne
  - Le cylindre fermé-ouvert correspond (*grosso-modo*) au cas de la clarinette

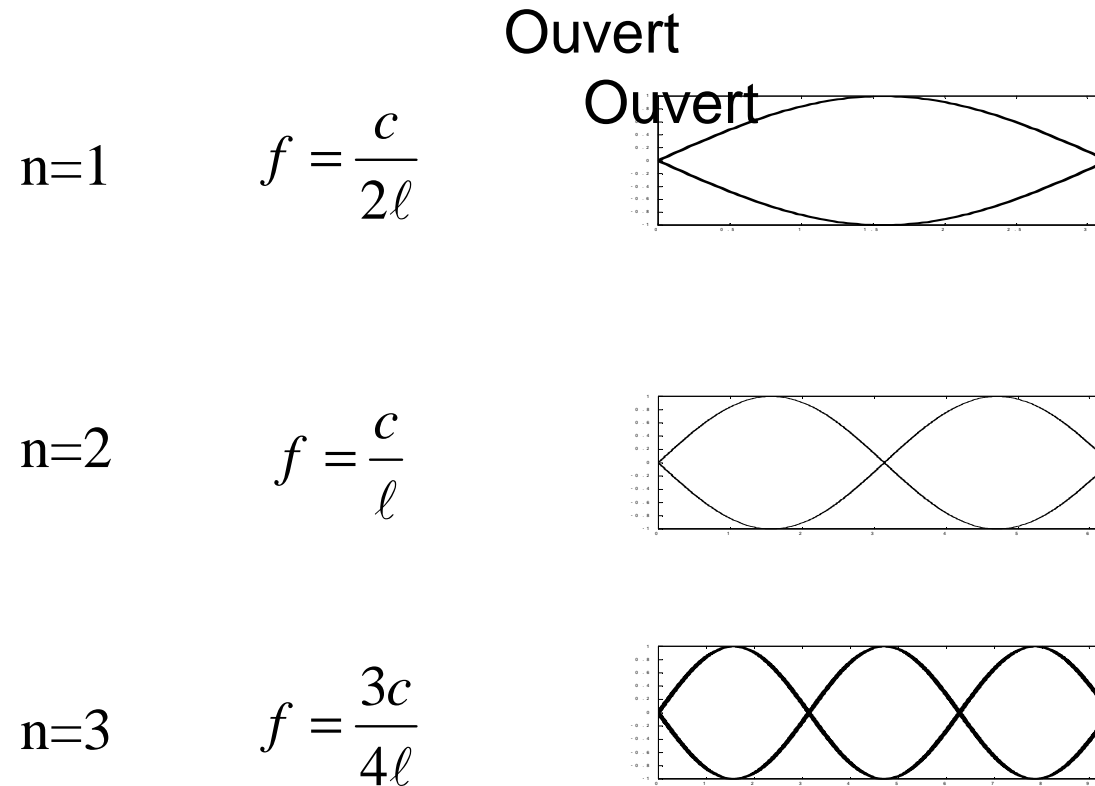
## Notions sur les guides d'ondes

# Modes propres d'un tuyau fermé-ouvert (résonateur quart d'onde)



## Notions sur les guides d'ondes

### Modes propres d'un tuyau ouvert-ouvert (résonateur demi-onde)



Il y a  $n$  ventres

## 1.2 Le résonateur : le cylindre

# Notion d'impédance

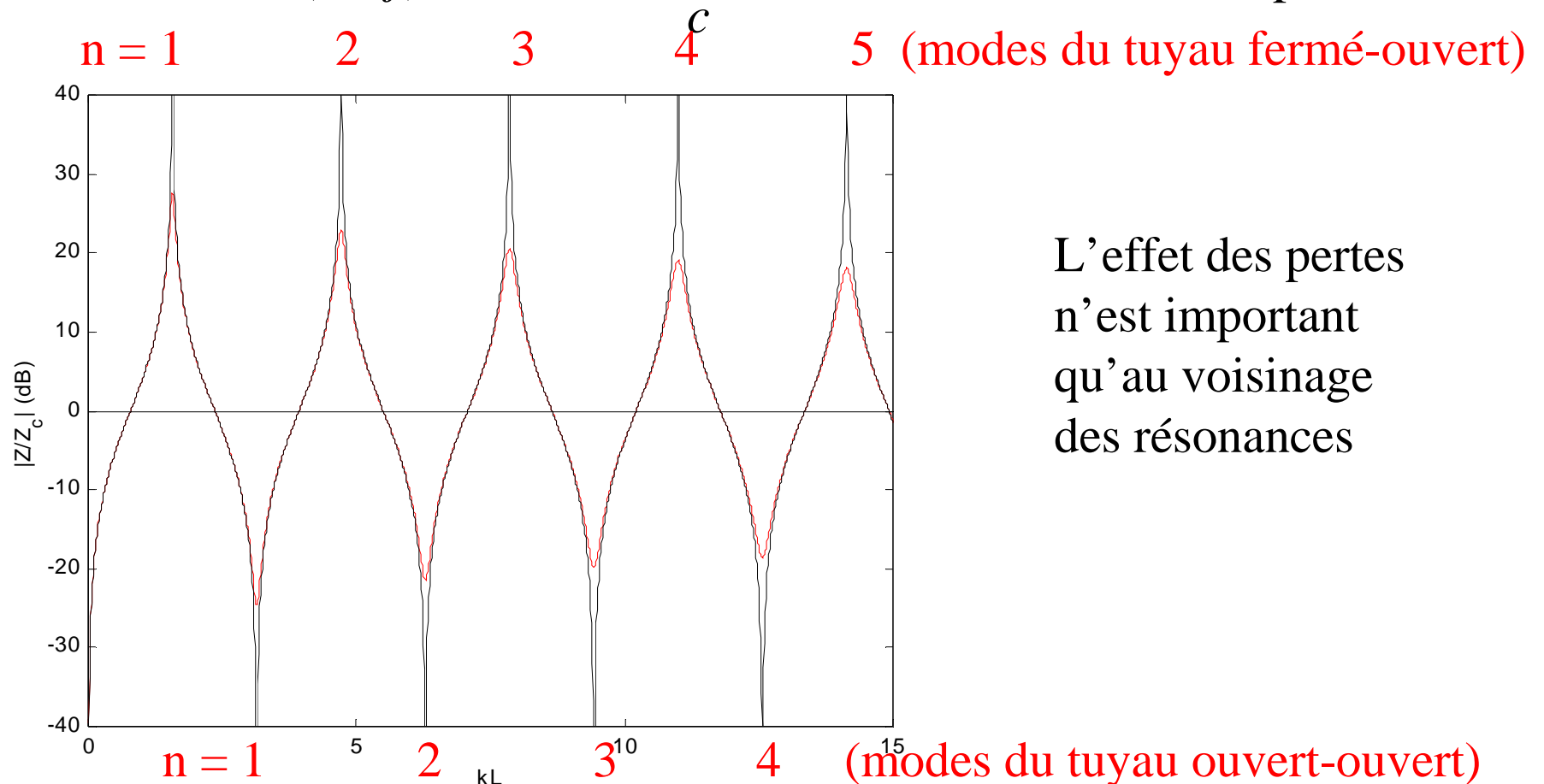
- L'impédance d'entrée est une grandeur complexe définie dans le domaine temporel : c'est la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle.
- L'impédance d'entrée  $Z$  (ou admittance  $Y=1/Z$ ) permet de caractériser un guide d'onde
- Les maximums de l'impédance sont les fréquences propres d'un résonateur fermé à l'entrée
- Les minimums de l'impédance (maximum d'admittance) sont les fréquences propres d'un résonateur fermé à l'entrée

## Influence des pertes sur l'impédance d'entrée

- Dans un tuyau cylindrique l'énergie est essentiellement dissipée par viscosité et échange de chaleur sur la paroi.

Mathématiquement ce phénomène est pris en compte en introduisant un nombre d'onde complexe

$$\bar{k} = k + (1 - j)\alpha \quad \text{avec } k = \frac{\omega}{c} \quad \text{et } \alpha \text{ coefficient d'absorption.}$$



L'effet des pertes n'est important qu'au voisinage des résonances

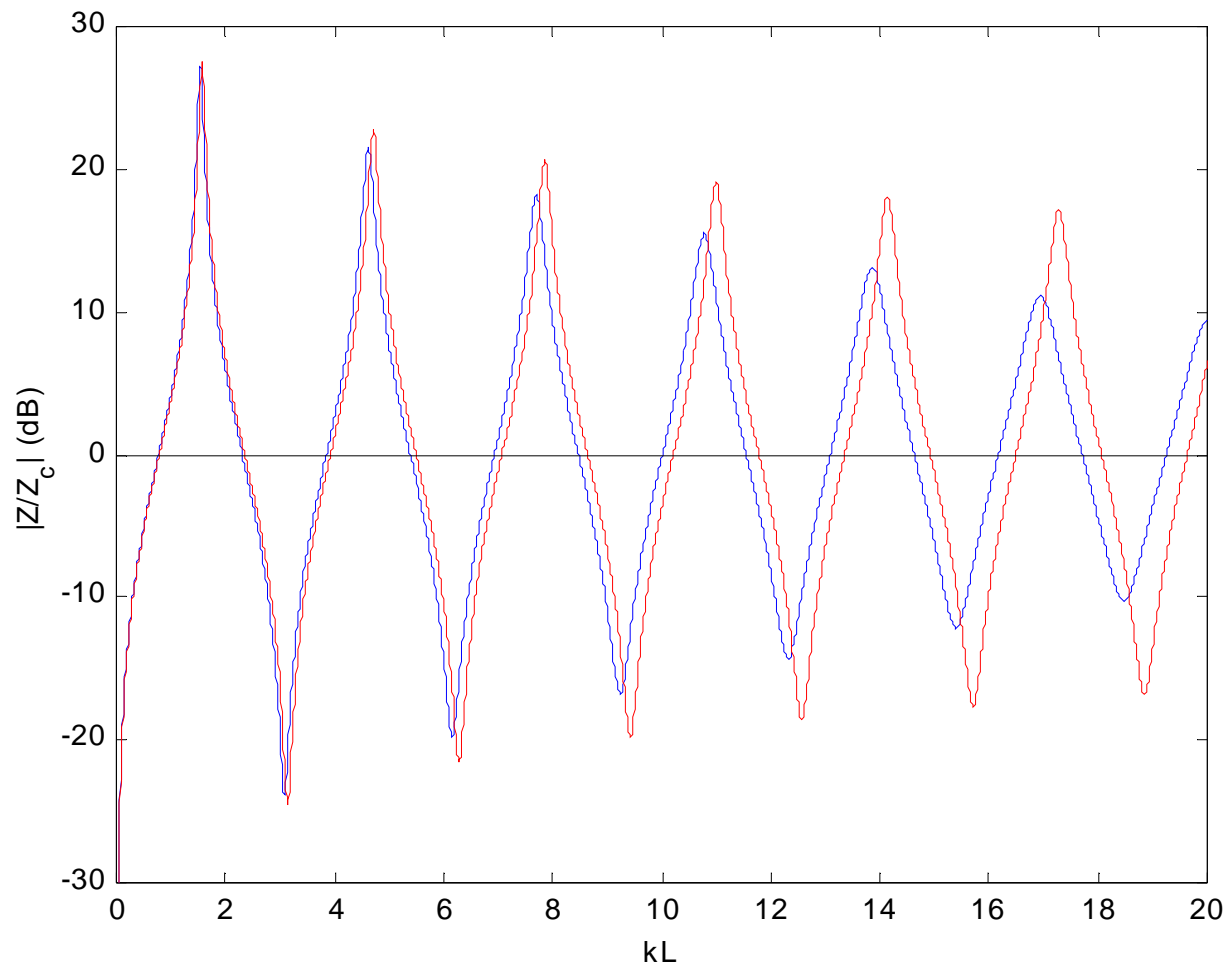


# Impédance d'entrée d'un tuyau cylindrique ouvert

- Lorsque un tuyau est ouvert l'impédance terminale (impédance de rayonnement) n'est pas exactement nulle.

On a :  $\arctan(Z_t / jZ_c) \approx k\ell_{eq} - j(kr)^2 / 4$  (sans écran)

et donc  $Z_0 = jZ_c \tan[k(\ell + \ell_{eq}) - j(kr)^2 / 4]$



- Tout se passe comme si le tuyau était un peu plus long.
- Les pertes aux hautes fréquences sont plus importantes.

## 1.2 Le résonateur : le cylindre

### Première conséquence

le second registre de la clarinette est à la douzième tandis que le second registre de la flûte est à l'octave

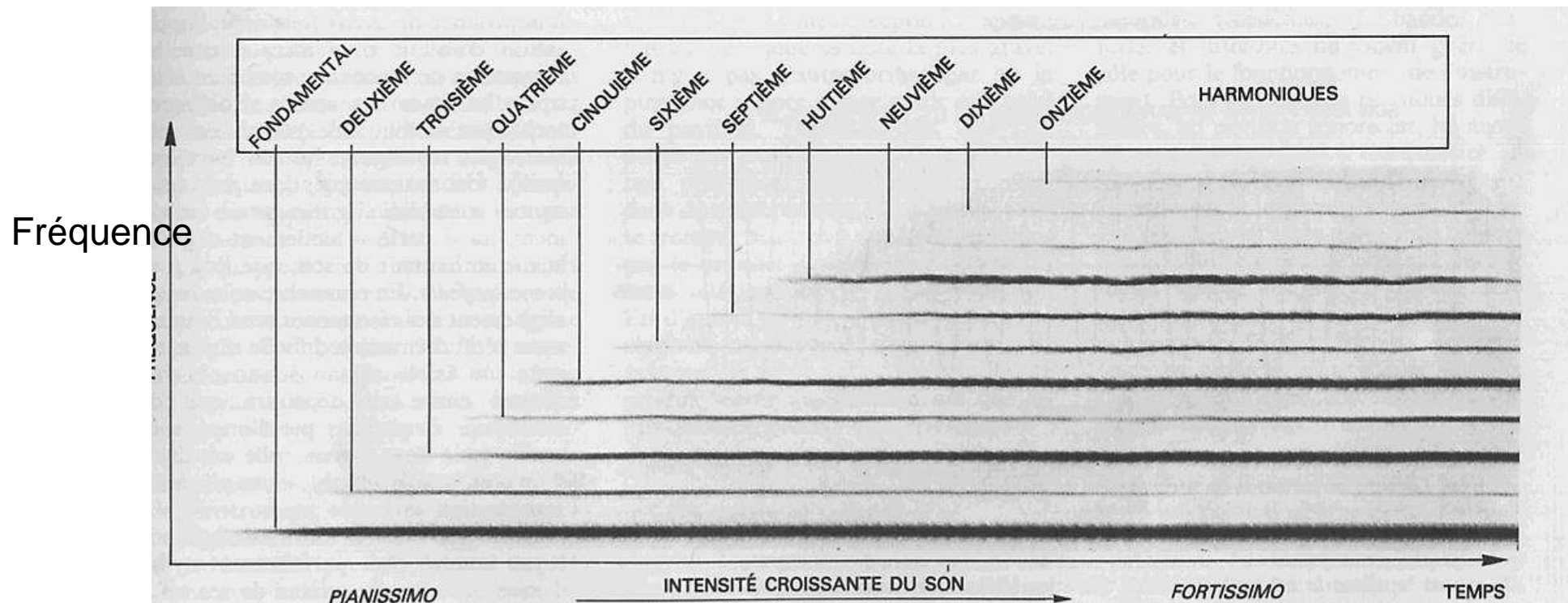
- Comme la seconde fréquence de résonance est 2 fois la première, avec le même doigté, la flûte peut jouer une note et son octave.
- Comme la seconde fréquence de résonance est 3 fois la première, avec le même doigté, la clarinette peut jouer une note et sa douzième.
- Pour jouer tout un registre la clarinette a besoin de plus de trous que la flûte ou le hautbois (17 trou contre 12).
- C'est sans doute pourquoi la clarinette est apparue tardivement au milieu du XVIII<sup>ème</sup> siècle (elle nécessite plus de clés).

## 1.2 Le résonateur : le cylindre

### Deuxième conséquence :

le spectre de la clarinette est pauvre en harmoniques pairs

- Spectre de la clarinette
  - Il n'y a pas de fréquences de résonance à  $2f_1$ ,  $4f_1$ ,  $6f_1$ , etc.
  - Dans le spectre les harmoniques pairs ont une faible amplitude: c'est la caractéristique principale du timbre de la clarinette.



## 1.3 Les résonateurs coniques

# Les résonateurs coniques

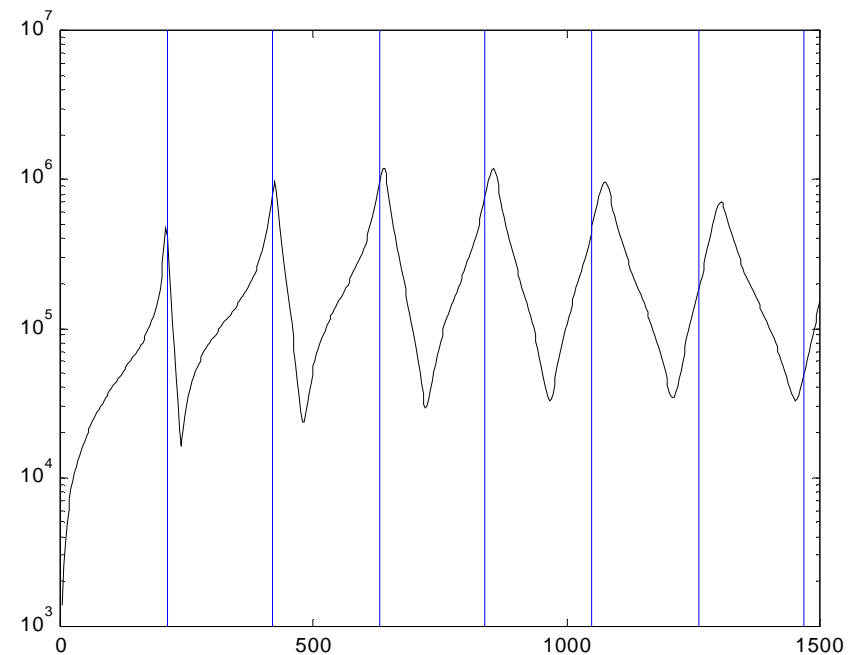
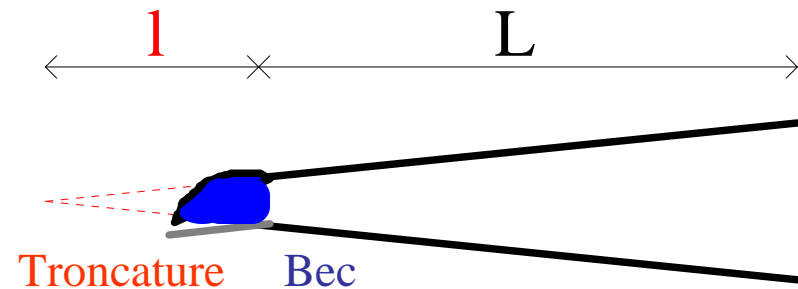
- Pour faire un instrument auto-oscillant il faut un résonateur ayant des fréquences propres harmoniques.
- Hormis le cylindre seules quelques géométries continues possèdent cette propriété
  - Pour la famille des flûtes les troncs de cônes (les flûtes sont soit cylindriques soit tronconiques)
  - Pour la famille des anches les cônes « complets » ont cette propriété
- D'autres résonateurs discontinus constitués de troncs de cônes (pour les flûtes) ou de cylindres (pour les anches) ont cette propriété

# 1.3 Les résonateurs coniques

## Le problème des instruments coniques à anche

- Seul le cône complet présente des résonances strictement harmoniques.
- Un instrument conique est constitué d'un tronc de cône et d'une embouchure qui doit par sa géométrie « remplacer » au mieux la partie manquante du cône.
- En particulier le volume équivalent du bec doit être proche du volume de la troncature.
- La sonorité de l'instrument dépend beaucoup de la géométrie du haut de l'instrument.

$$Z = \frac{jZ_c}{\underbrace{1/kl}_{\text{Troncature}} - \underbrace{kl/3 + \cot kL}_{\text{Volume du bec}}}$$

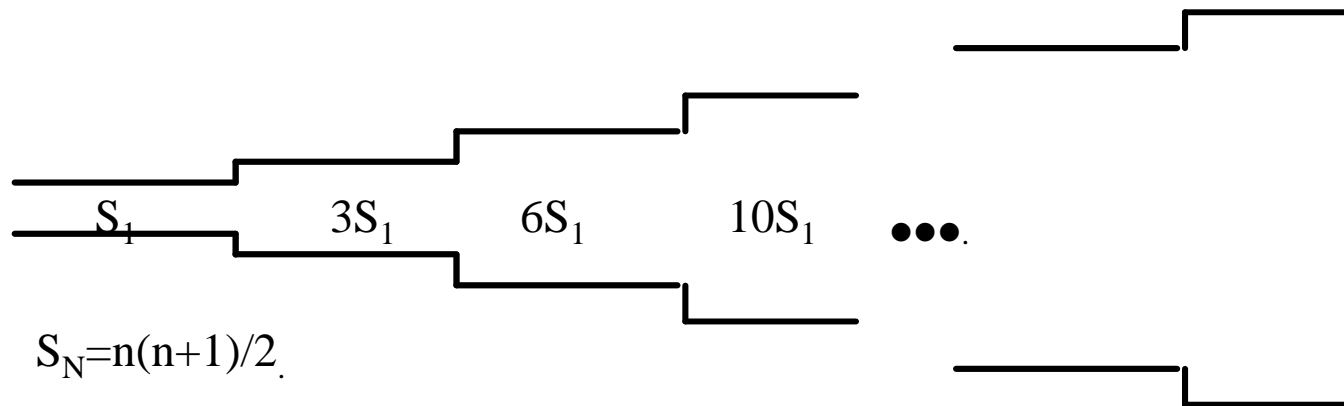


Impédance d'un cône avec volume égal au volume de la troncature

## 1.3 Les résonateurs coniques

### Les cônes en escalier « harmoniques »

- Ce sont des résonateurs constitués de  $N$  tronçons cylindriques de même longueur et tels que la section du  $n^{\text{ième}}$  tronçon est égale à  $n(n+1)/2$  fois la section du premier tronçon



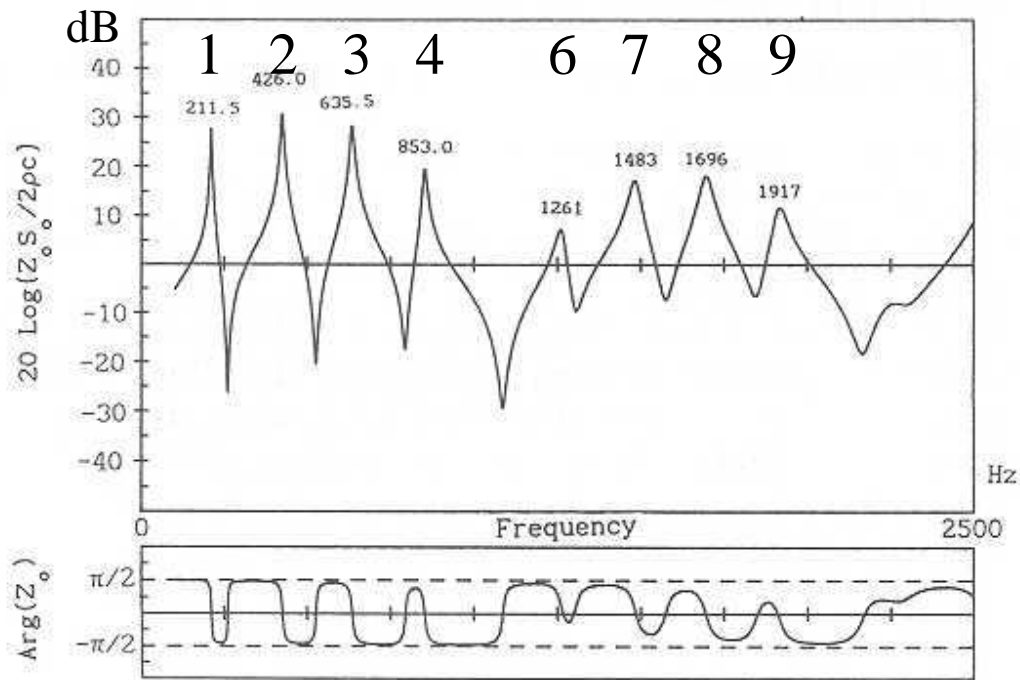
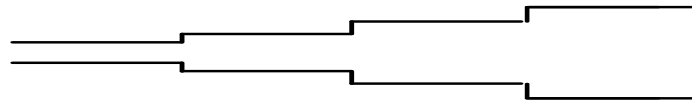
Cas particuliers :

$N=1$  cylindre

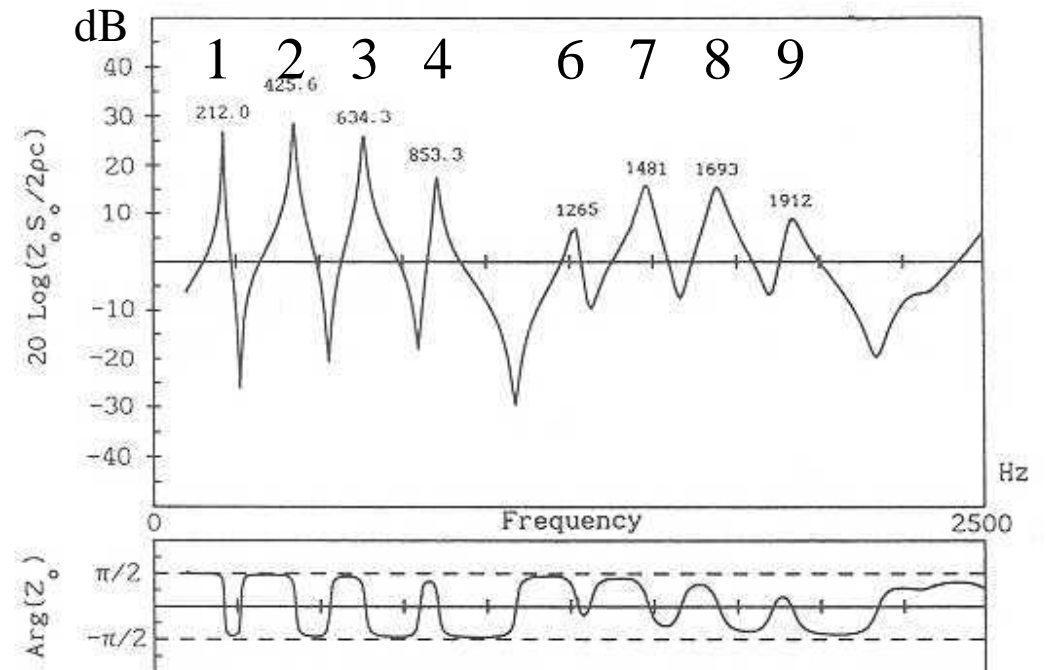
$N=\infty$  cône complet

# 1.3 Les résonateurs coniques

## Impédance calculée et mesurée d'un cône en escalier constitué de 4 cylindres



Théorie



Expérience

Propriété remarquable : le cinquième pic est manquant (c'est à dire le  $(N+1)^{ième}$  avec  $N=4$ ).

Si  $N=1$  c'est le deuxième et tous ses multiples => cas de la clarinette)

## 1.5 Le résonateur : les cuivres

### Résonateurs cylindro-coniques

- Pour les instruments à embouchure de cuivre l'harmonicité des fréquence de résonances n'est pas aussi critique que pour les instruments à anche.
- Les résonateurs cylindro-coniques sont intermédiaires entre le cylindre et le cône
  - Dominante conique = cuivres doux = bugles, tubas, clairon
  - Dominante cylindrique = cuivre clair = trompette, trombone



## 1.5 Le résonateur : les cuivres

### Résonateurs cylindro-coniques

Le Cylindre : de la série 1 3 5 à la série 1 2 3

Les résonances d'un cylindre suivent la série :

1            3            5            7            9            ....

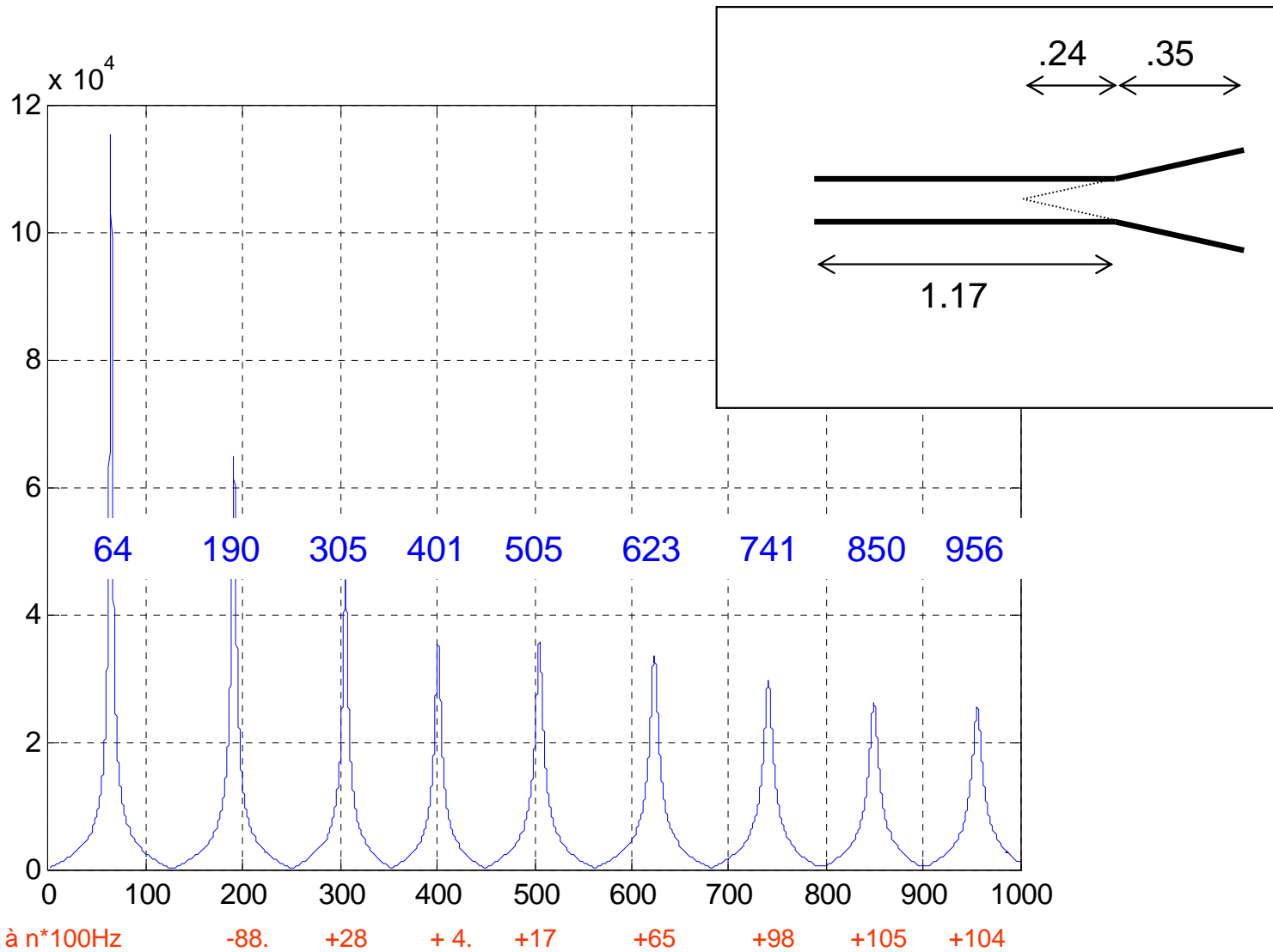
Multipliant par 0.6 on obtient

0.6	1.8	3	4.2	5.4
Définitivement trop bas	trop bas (-182 cent)	OK	trop haut (+84 cent)	trop haut (+133 cent)

En ajoutant un pavillon bien dimensionné on peut rendre les fréquences harmoniques

# 1.5 Le résonateur : les cuivres

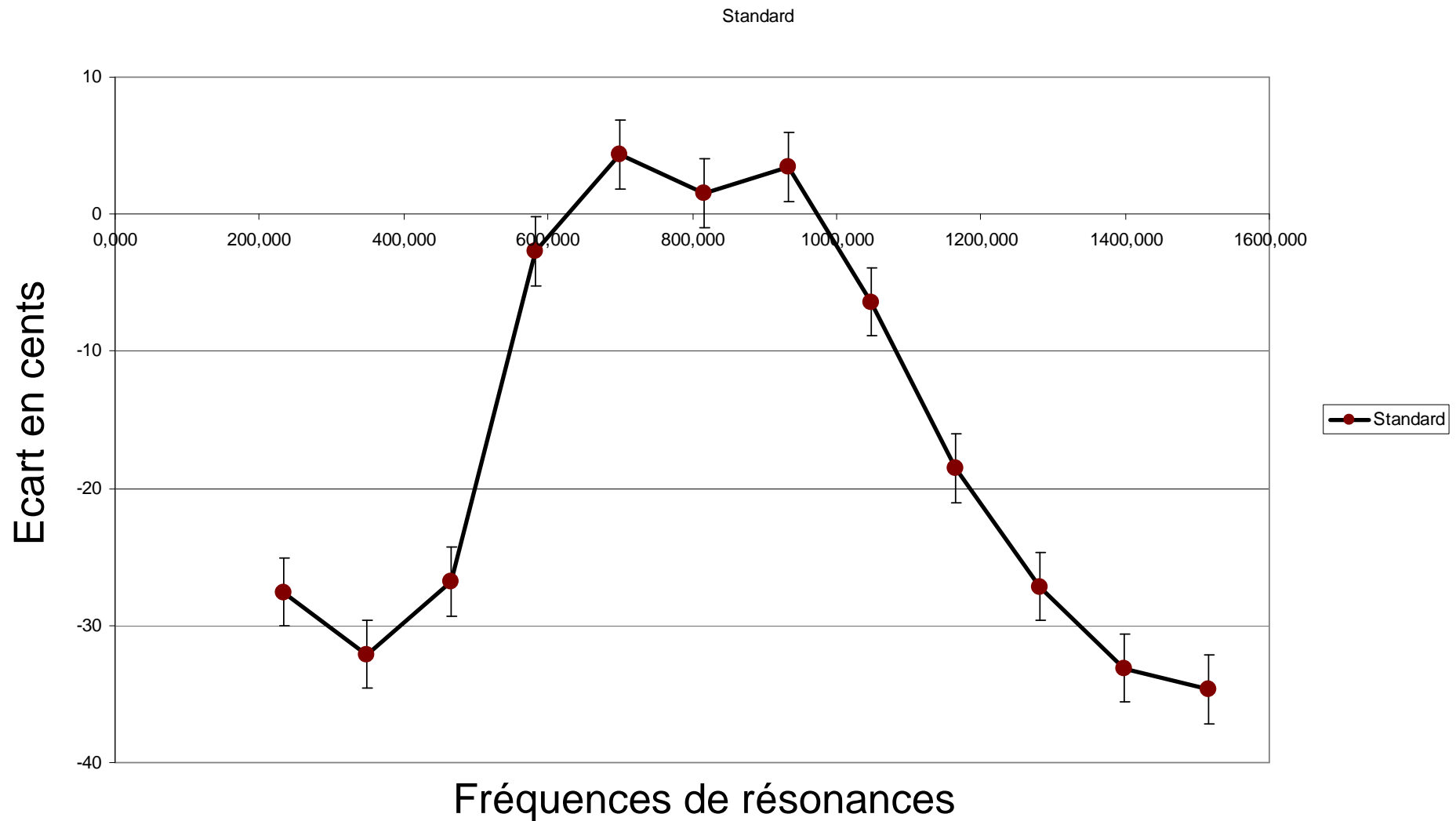
## Résonateurs cylindro-coniques



En combinant un cylindre avec une portion de cône on obtient un résultat acceptable (+- 6% sur les partiels 2 à 8)

# 1.5 Le résonateur : les cuivres

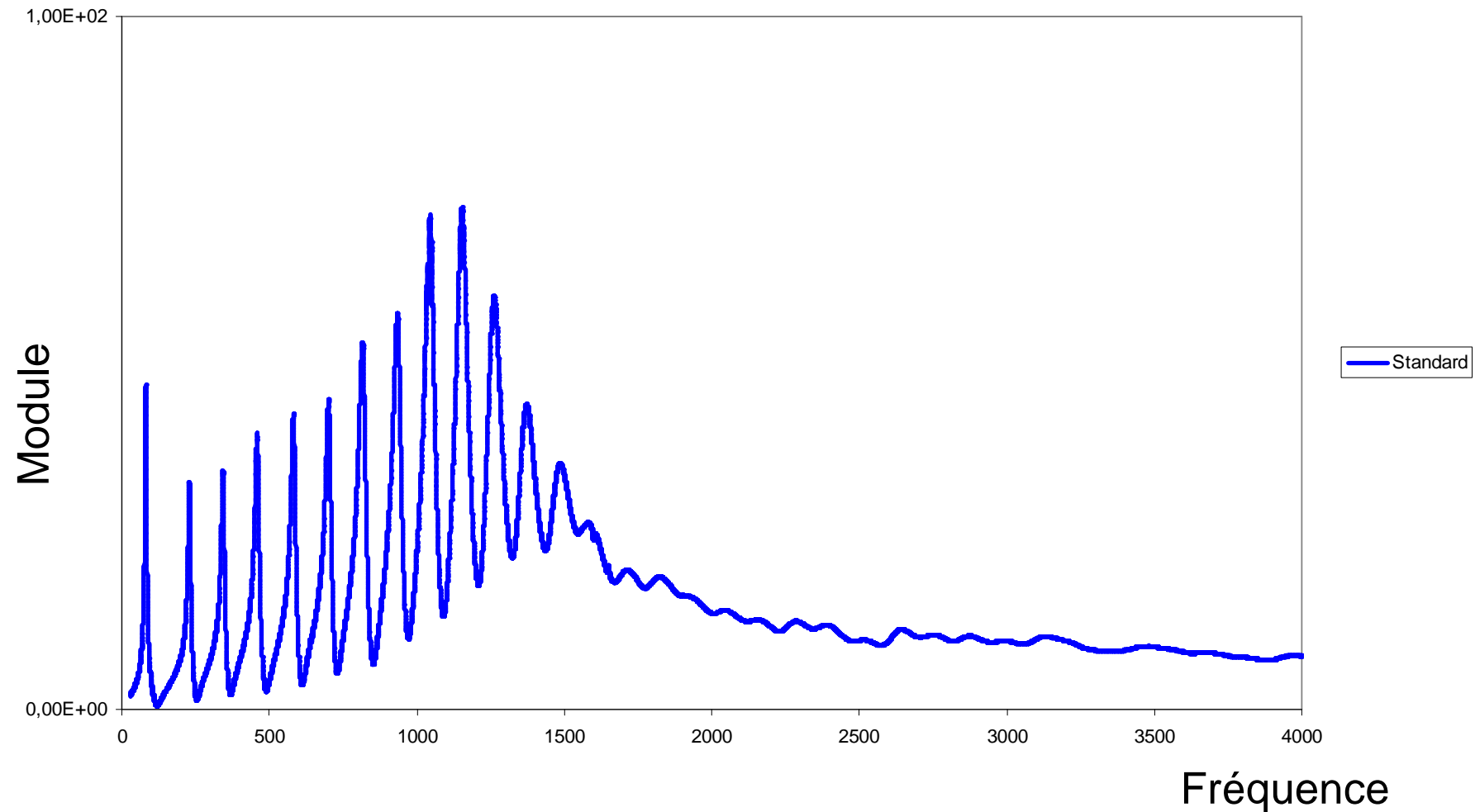
## Inharmonicité d'une trompette réelle



# 1.5 Le résonateur : les cuivres

## Rôle de l'embouchure

Impédance d'entrée d'une trompette



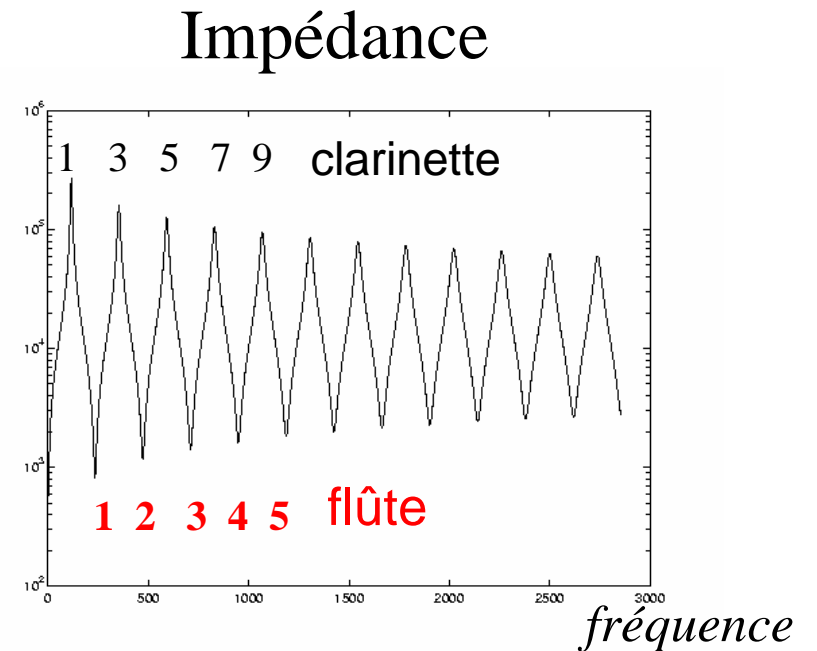
L'embouchure a pour effet de faciliter l'émission de partiels d'ordre élevés

# Principales caractéristiques d'un résonateur cylindrique (flûte)

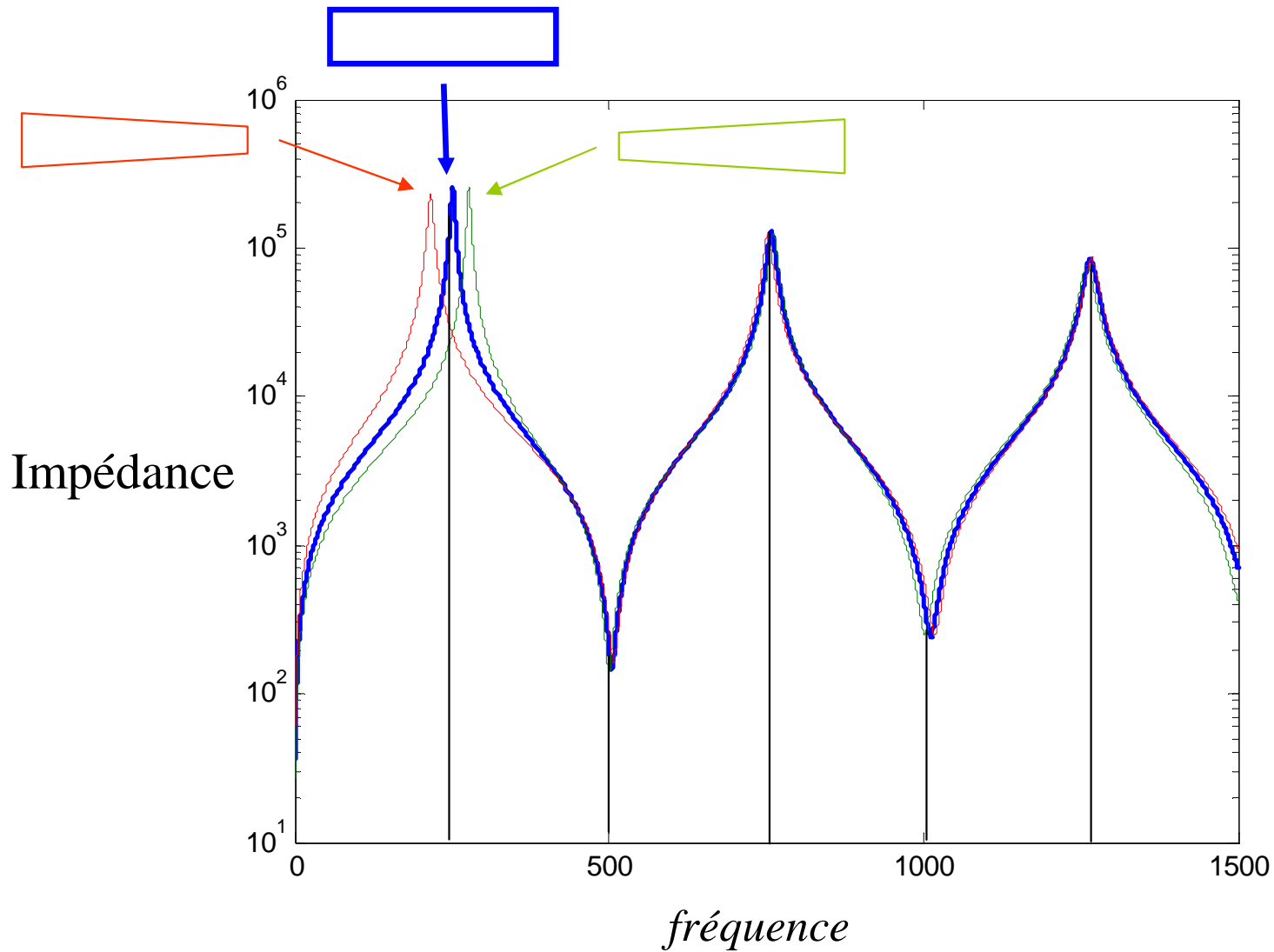
- Fréquences de résonance
  - $f_n = nc/(2L)$  avec  $L$  la longueur et  $c$  la vitesse du son (343m/s a 20° mais 349m/s a 30°).

Exemple :  $L=40\text{cm}$   $f_1 = 440\text{Hz}$  (La)  
 $f_2 = 2f_1 = 880\text{Hz}$  (La)  
 $f_3 = 3f_1 = 1320\text{Hz}$  (Mi)

La flûte octavie.



# Flûte : cylindrique ou conique ?



Instrument à anche  
=> grosse différence

Flûte  
=> faible différence

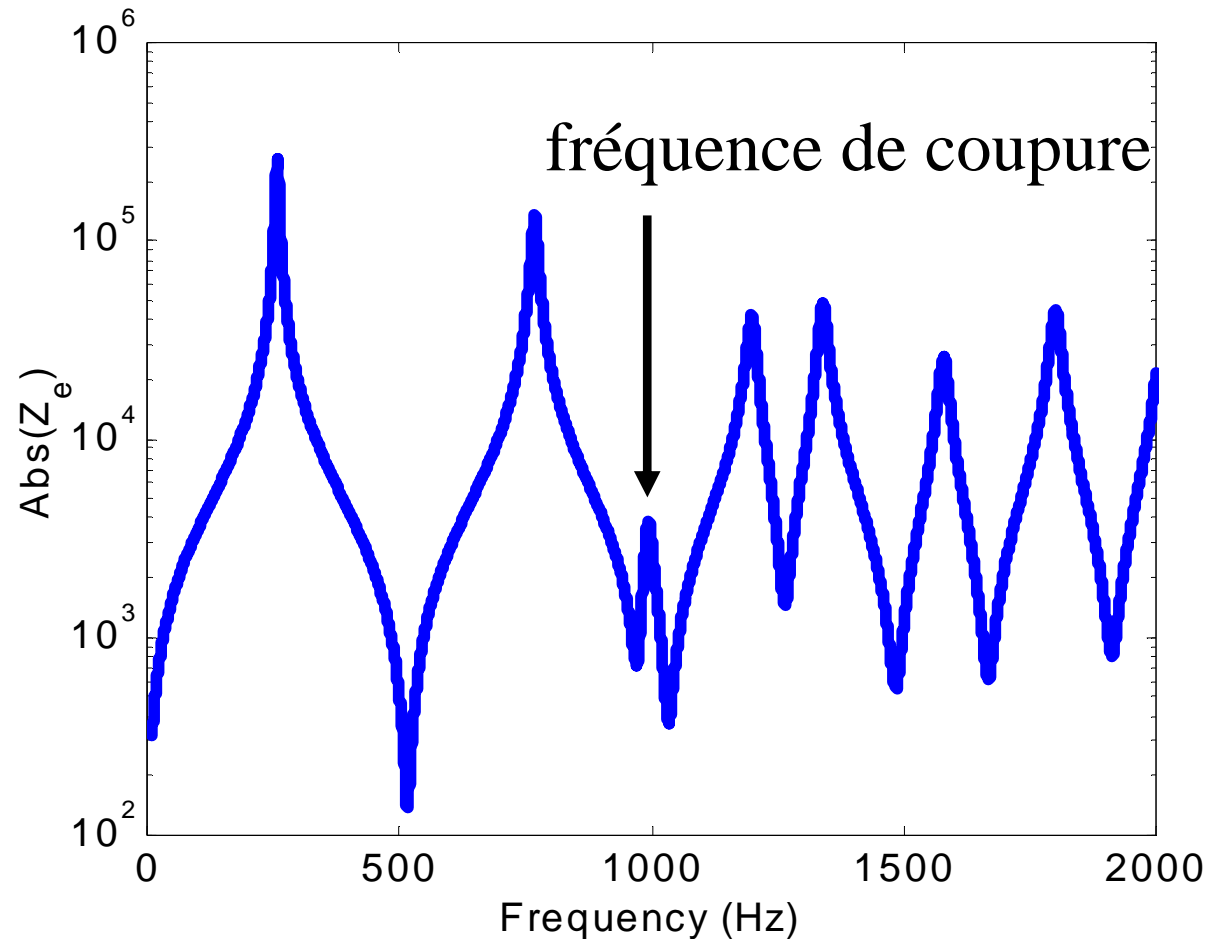
# L'embouchure

- Le résonateur n'est pas que le tuyau :
  - Le trou d'embouchure fait partie du résonateur
  - Il peut être modélisé comme une longueur ajoutée à celle du tuyau
  - Comme le flûtiste couvre plus ou moins l'embouchure avec les lèvres la fréquence de jeu dépend de la « couverture »

# 1.7 Le résonateur : Pavillon et réseau de trous latéraux

## Effet d'un réseau de trous latéraux

11

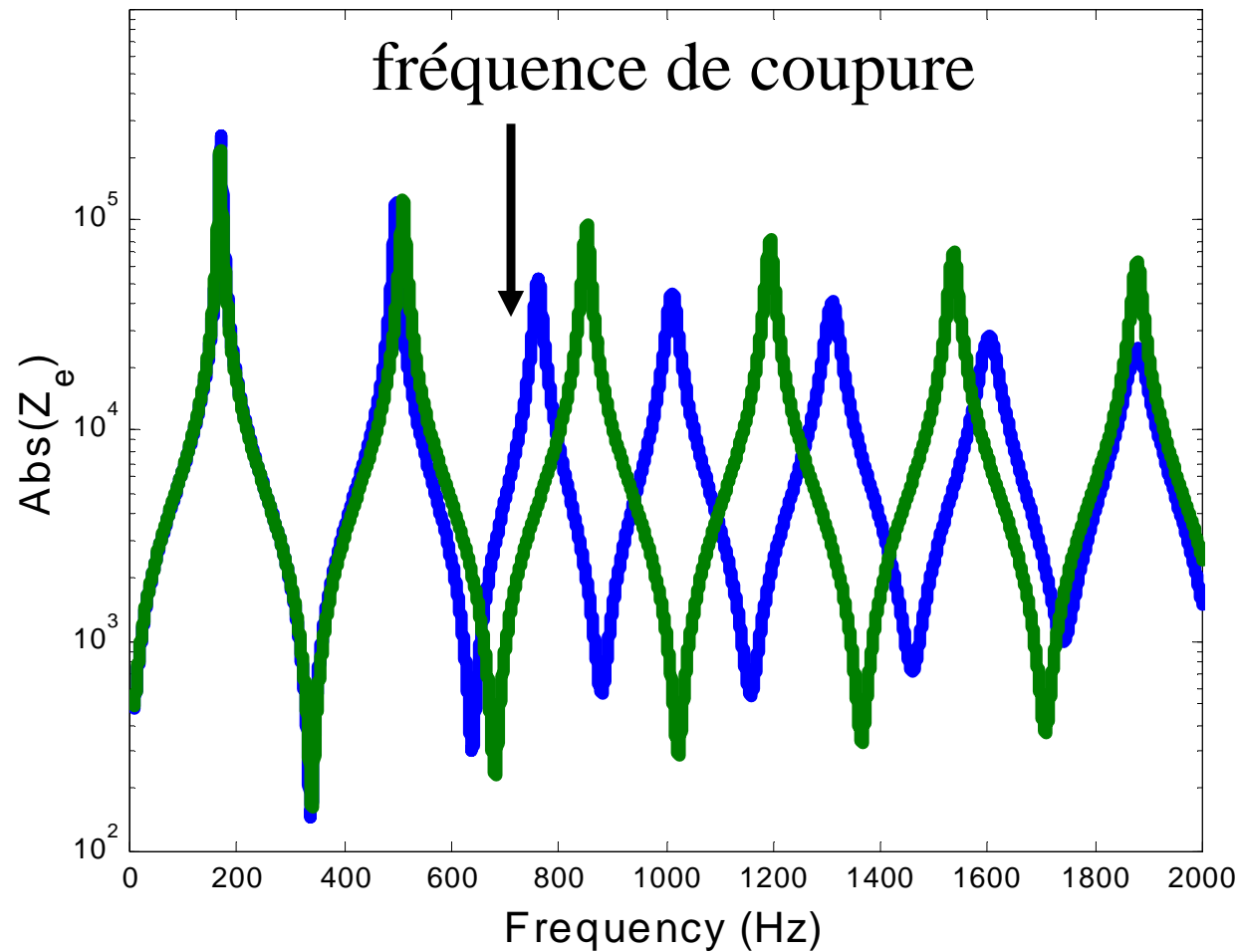


Impédance d'entrée d'un tube avec des trous latéraux



# 1.7 Le résonateur : Pavillon et réseau de trous latéraux

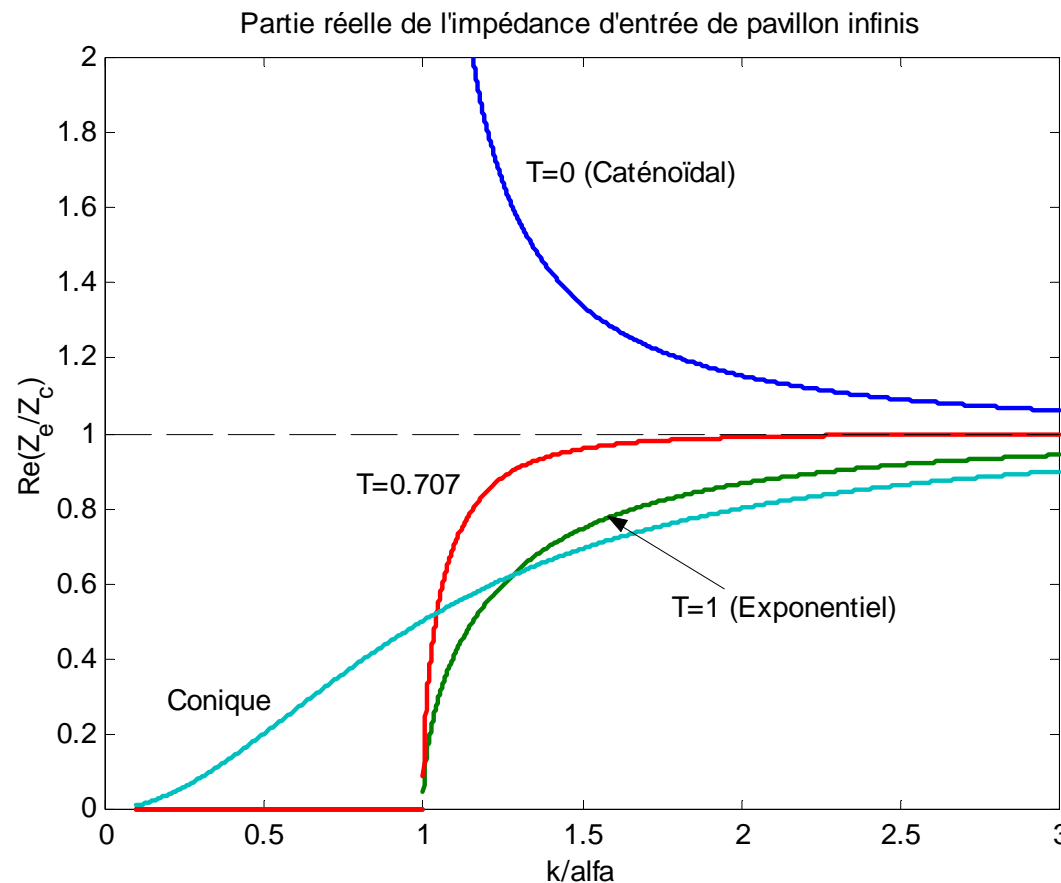
## Effet du pavillon d'une clarinette



# 1.7 Le résonateur : Pavillon et réseau de trous latéraux

## Qu'est-ce qu'un bon pavillon ?

- Le pavillon idéal réfléchit complètement les ondes en dessous de sa fréquence de coupure et pas du tout au-delà
- Le pavillon caténoïdal ( $T=0.707$ ) est celui qui se rapproche le plus de l'idéal



NB :  $\text{Re}(Z/Z_c)=1 \Leftrightarrow R=0$

## 1.8 Le résonateur non linéaire

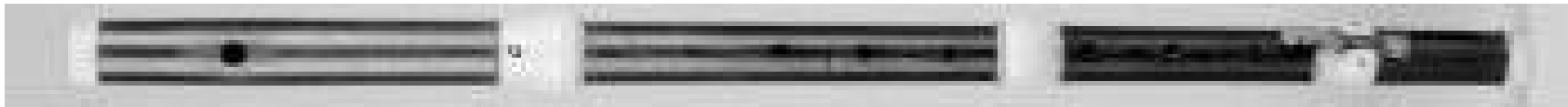
### Le résonateur non linéaire

- Le résonateur est en général supposé linéaire.
- Qu'en est-il réellement ?
- Les niveaux de pression et les vitesses dans l'instrument sont tellement élevés que certaines hypothèses de l'acoustique linéaire sont parfois prises en défaut : l'impédance ne rend pas compte de tous les phénomènes.
  - Exemples : ondes de choc (cuivres),  
instruments baroques (petits trous).

## 1.8 Le résonateur non linéaire

# Comparaison entre une flûte baroque et une flûte moderne

Gamme chromatique sur une flûte baroque



 Track 1

Gamme chromatique sur une flûte système Boehm



 Track 2

**M. Castellengo and L. Forest:** “*Métamorphoses de la flûte traversière au 19<sup>ème</sup> siècle : esthétique musicale, acoustique et facture*”, actes du colloque *Acoustique et instruments anciens*, 85-100, Paris 1998.

## 1.8 Le résonateur non linéaire

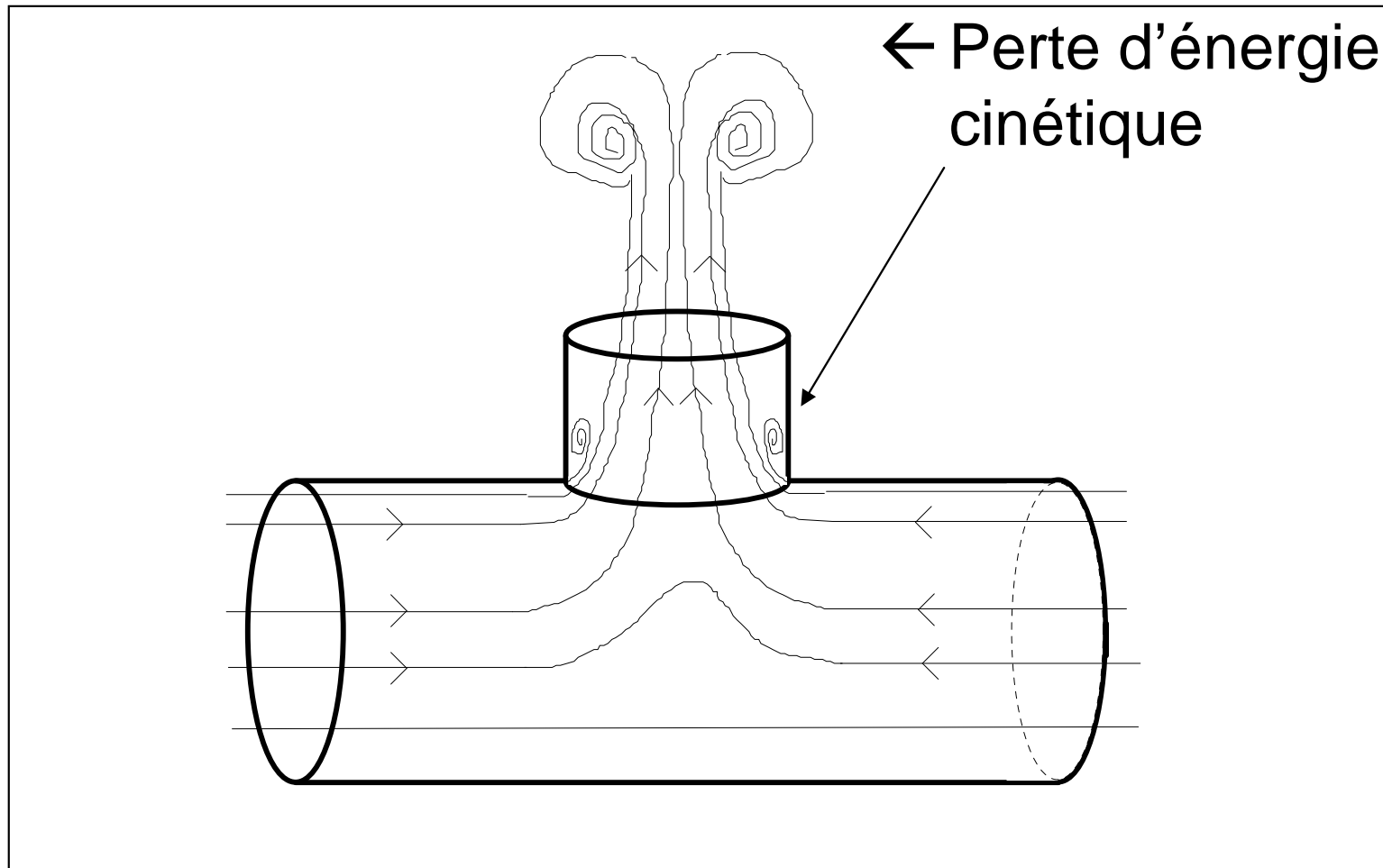
### Une contradiction apparente

- Expériences sur différentes flûtes (M. Castellengo):
  - *La principale différence entre une flûte baroque et une flûte moderne réside dans le diamètre des trous.*
- Théorie basse fréquence de l'acoustique linéaire :
  - *le débit rayonné par un trou latéral ne dépend pas du diamètre du trou.*

Contradiction  $\Rightarrow$  certaines hypothèses de la théorie linéaire ne sont plus valides.

## 1.8 Le résonateur non linéaire

### Formation de jet + tourbillons



## 1.8 Le résonateur non linéaire

# Conséquences du comportement non linéaire d'un trou latéral

- Conséquence sur la fréquence
  - Dans certains cas, la fréquence diminue lorsque l'on souffle plus fort.
- Conséquence sur le timbre
  - Le timbre est plus sourd (spectre moins riche en harmoniques élevés).
- Conséquence sur la dynamique de jeu
  - La dynamique de jeu est réduite (à la limite nulle).
- Conséquence sur la jouabilité
  - Un instrument à petit trous est plus difficile à jouer.

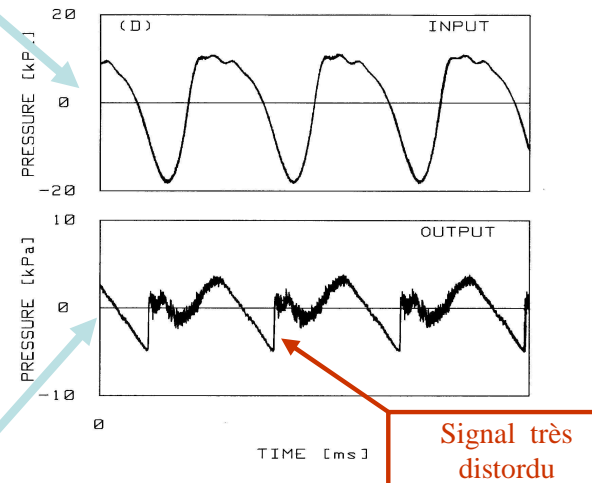
## 1.8 Le résonateur non linéaire

# Propagation non linéaire sur le son d'un instrument à embouchure



Mesuré dans  
l'embouchure

Mesuré à la  
sortie de  
la coulisse

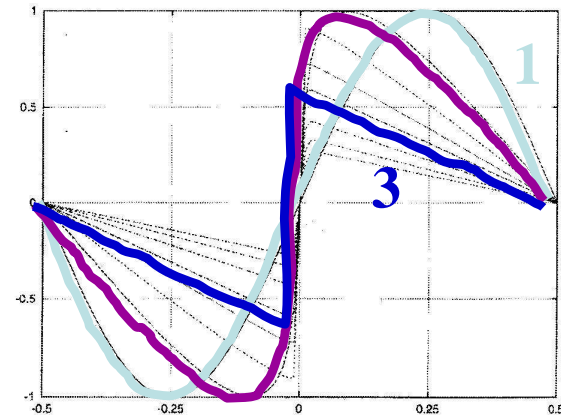




## 1.8 Le résonateur non linéaire

# Propagation non linéaire sur le son d'un instrument à embouchure

Propagation non-linéaire de l'onde progressive initialement harmonique



**Illustration** sonore (de 1 à 3 à 1)  
(Christophe Vergez, Paris, 2000).



Déformation de l'onde au cours de la propagation (distorsion, onde de choc)