



Les instruments de musique

A chacun son timbre, une seule physique !

Jean Kergomard
avec Antoine Chaigne,
ainsi que Ph. Guillemain, C. Vergez, Th. Hélie, B. Fabre, J.P.
Dalmont, J. Gilbert

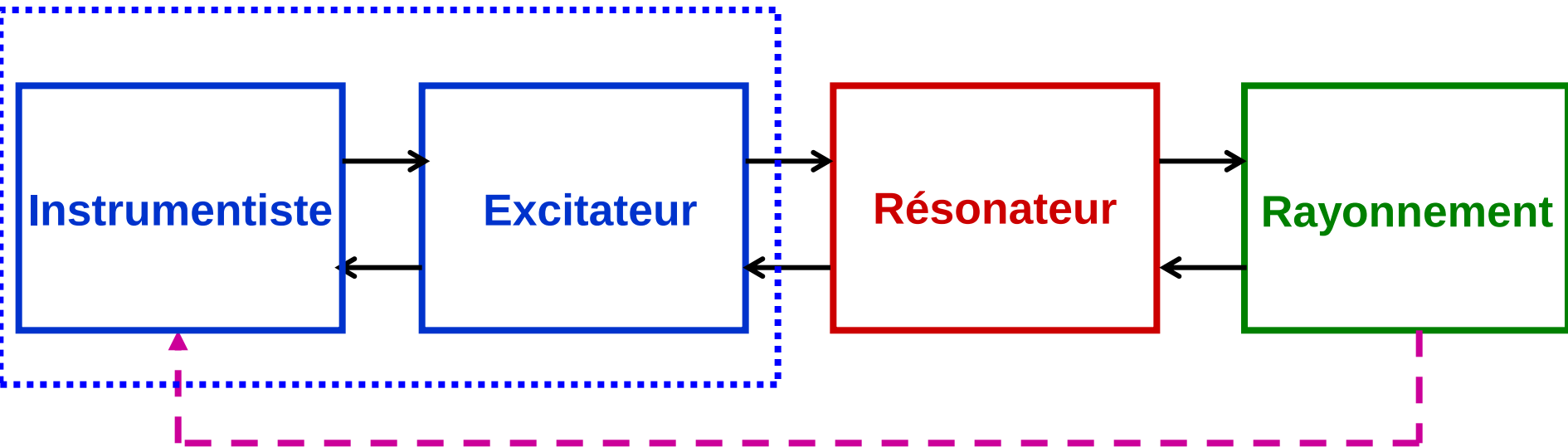


Les instruments de musique

1. Schéma général
2. Modes propres et couplages
3. Oscillations libres
4. Auto-oscillations
5. Rayonnement
6. Conclusion



Schéma général

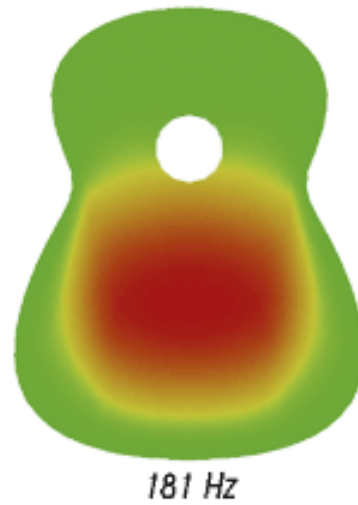


Modes et fréquences propres

Ex : modes propres d'une table d'harmonie de guitare



Ex : modes propres d'une table d'harmonie de guitare



Modes propres (MP) et fréquences propres (FP)

- Par quoi sont-ils définis ? géométrie et matériaux (exemples)
- Linéarité (hyp. d'amplitude) : cas limite idéal
- Trois attributs : forme (spatiale), fréquence et amortissement (temps: sinusoides amorties)
- Amortissement: plusieurs causes (en fait, modes complexes)
- Fréquences : Inharmonicité

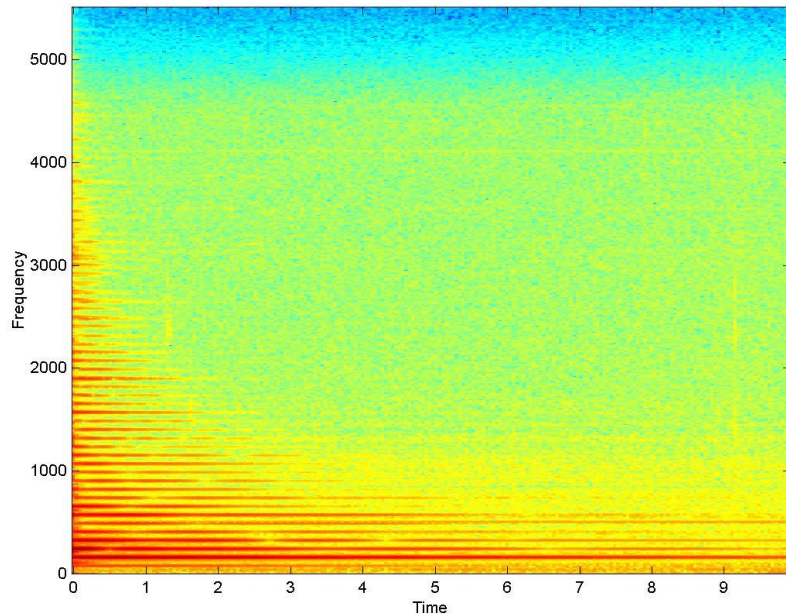
Structures élémentaires et couplages

- Cordes-table (ex : guitare, violon)
- membrane-cavité (timbale)
- autres...
- Conséquences :
 - modifications des MP, des FP (en particulier des amortissements,...)

Oscillations libres

- Excitation brève devant la période
 - Ex: cordes pincées, frappées, percussions, violon pizz.
- Cas linéaire :
 - son composé des FP (pas forcément harmoniques)
 - amplitude des MP dépend de la position d'excitation
- Cas non linéaire (démonstration : gong)
 - combinaison de modes
 - enrichissement spectral
 - chaos

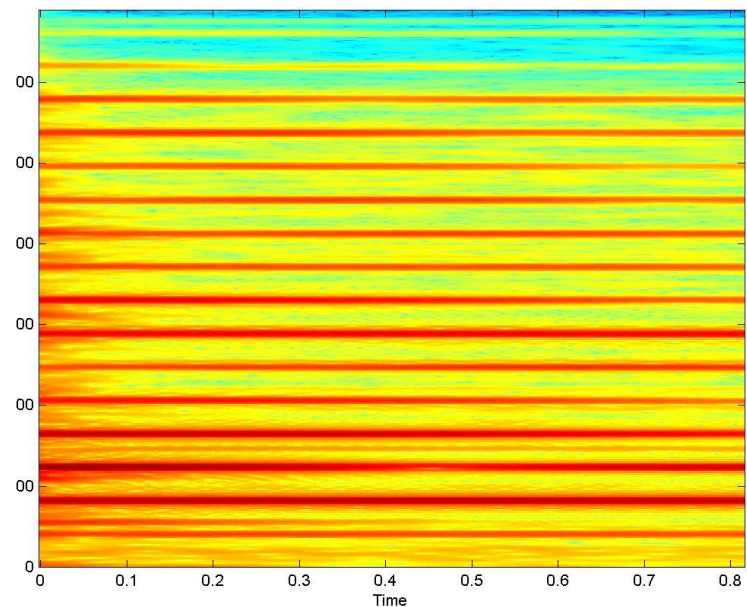
Guitare : spectrogrammes (Mi 6)



Durée = 10 s



Enregistrement



Durée = 1s

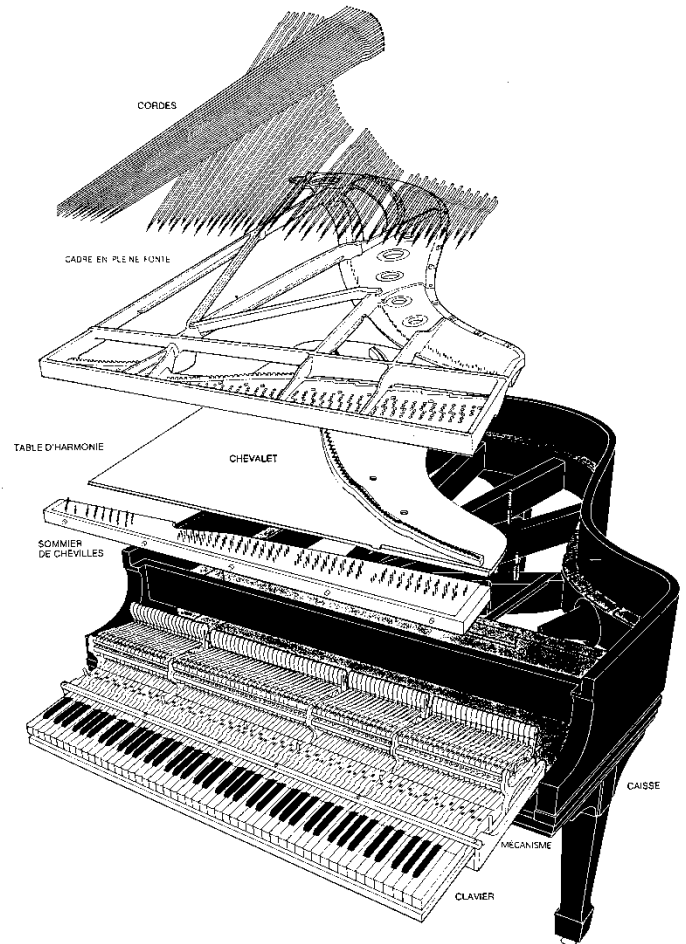


Simulation

SGA/SSA

Instruments à cordes

- La corde : vibration quasi-périodique
- La corde seule ne rayonne pratiquement pas de son
- Constituants :
 - Cordes
 - Excitateur (doigt, marteau,...)
 - Chevalet
 - Table d'harmonie
 - Cavités d'air
 - Ouvertures



Couplage corde-table d'harmonie

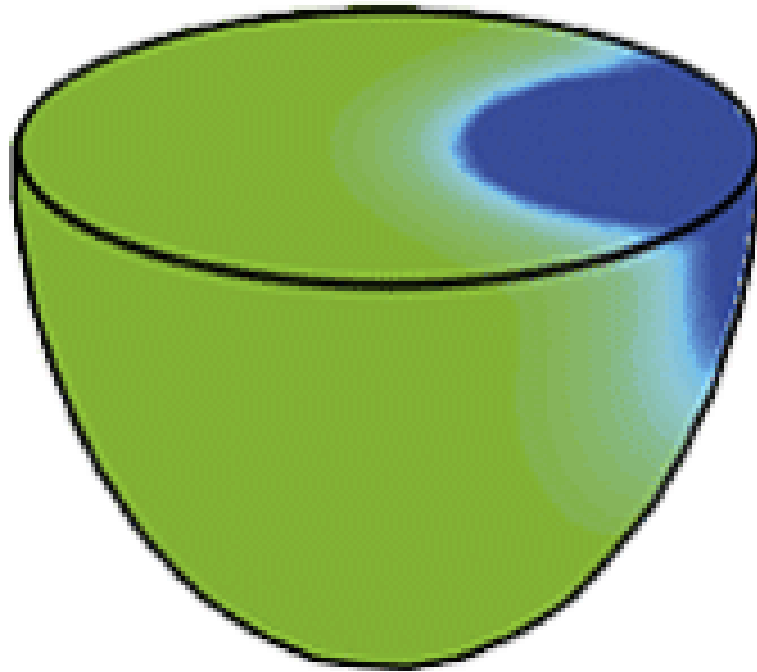


Couplage membrane-cavité (timbale)

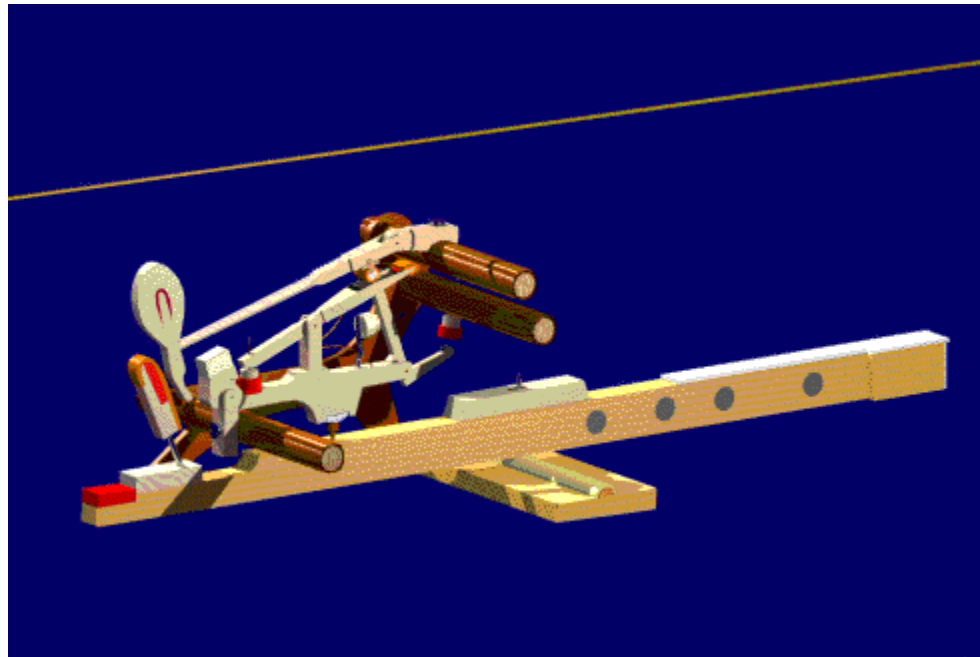
L'impact de la mailloche crée une dépression localisée sur la membrane



Couplage membrane-cavité (timbale)

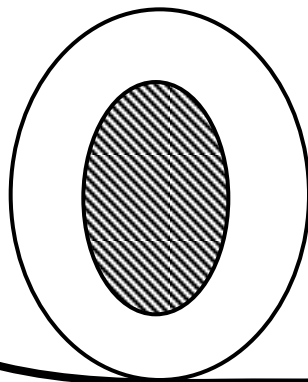


Oscillations libres : exemple du piano



Agrafe

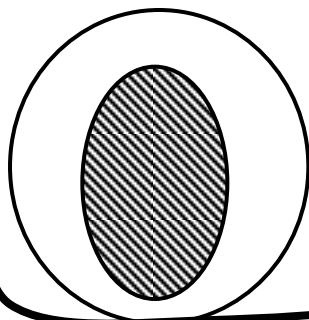
(1)



V_0



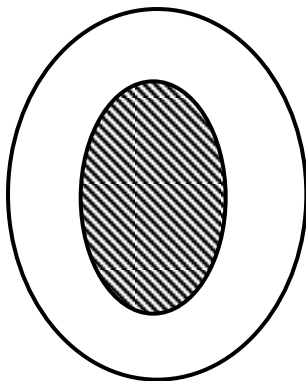
(2)



Vers le chevalet



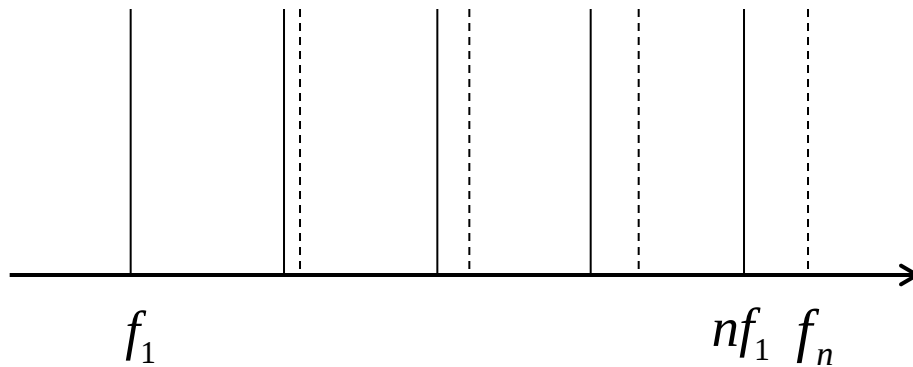
(3)



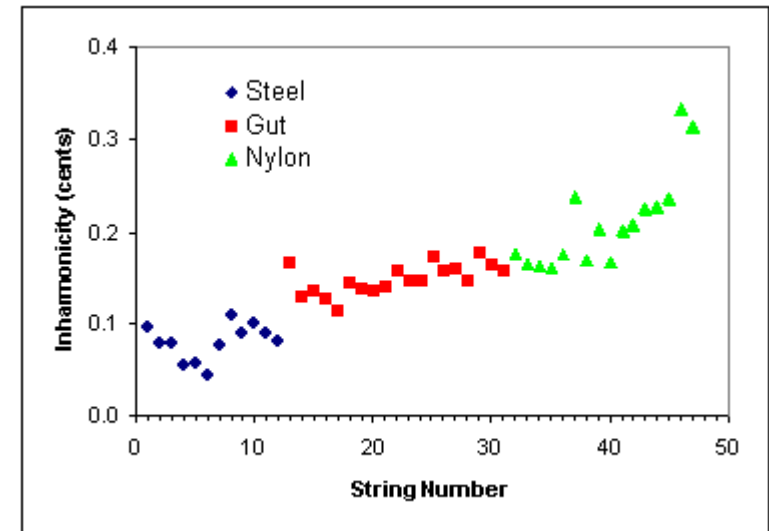
SGA/SSA



Inharmonicité



$$I_{nh}(\%) = \frac{f_n - nf_1}{nf_1}$$



Ex : harpe

Un ton = 200 cents

$$1 \text{ cent} = 2^{\frac{1}{1200}} \cong 1,00058$$

Inharmonicité (perception)

- Sons périodiques ou quasi-périodiques :

Instruments à vent, violon, guitare

- Modes légèrement inharmoniques

Piano, timbale

- Modes très inharmoniques

Percussions, cloches, etc.

Cymbales et gongs :

oscillations non linéaires



doux



moyen

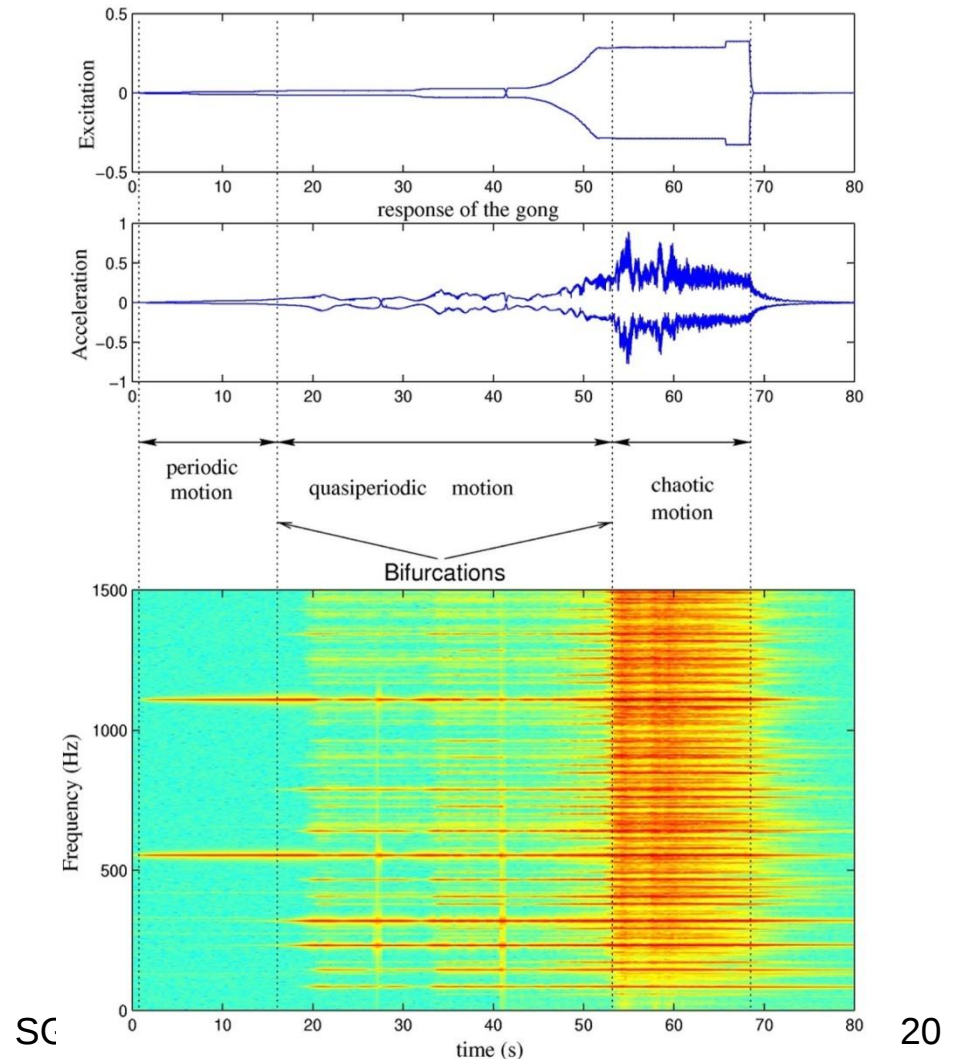


fort



Excitation forcée sinusoïdale

- Force d'amplitude lentement croissante
- Observation successive de régimes linéaires, faiblement non linéaires et chaotiques
- Exemple d'une cymbale
- Exemple d'un gong



Auto-oscillations

- Une curiosité : 3 catégories (et pas plus)
 - instruments frottés (cordes, scie, tiges verre)
 - Instruments à anche (y.c. cuivres, et voix)
 - Famille des flûtes
- Excitation « continue » (lentement variable) produit un son (variation rapide) $\Rightarrow$ non-linéarité

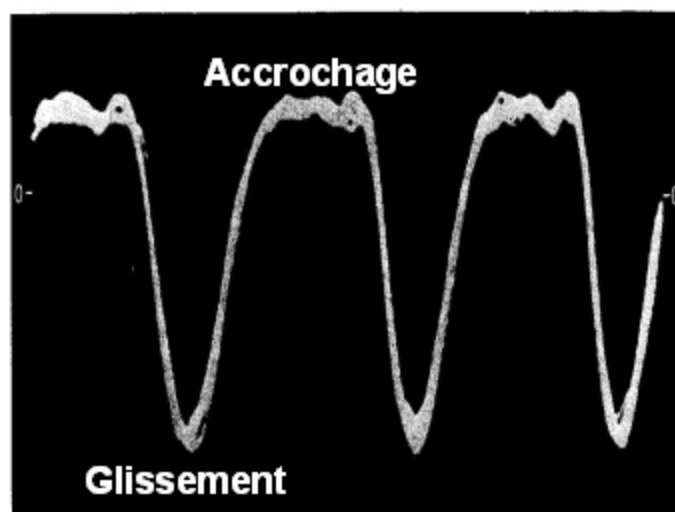
Auto-oscillations

- Une autre curiosité : **nette distinction des AO et oscillations libres (ex. corde frottée ou pizzicato)**
- **Les régimes d'auto-oscillations couplent les modes** au lieu de les superposer, comme les oscillations libres :
 - fréquences de jeu proches de fréquences propres
 - Mais après un transitoire, son périodique (spectre parfaitement harmonique, d'où hauteur perçue bien définie)
 - Compromis entre justesse et facilité de jeu
 - Amortissement → seuils d'oscillations (facilité de jeu)

Le mouvement de Helmholtz dans les instruments à corde ou à anche conique

Corde frottée

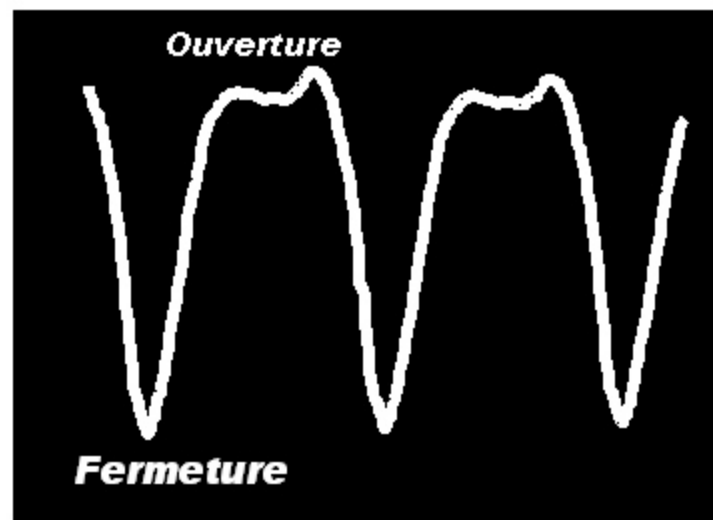
Alternance d'épisodes d'**accrochage** et de **glissement**.



Signal de vitesse au contact
corde - archet.

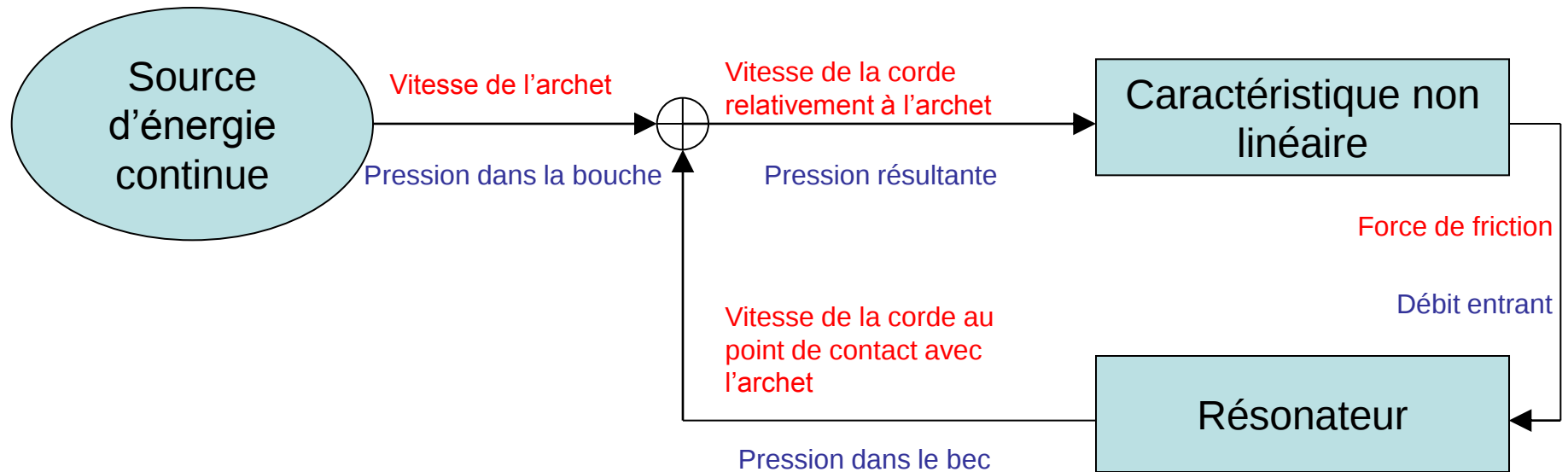
Instrument à anche

Alternance d'épisodes d'**ouverture** et de **fermeture** du bec.



Signal de pression dans le bec d'un
saxophone.

Schéma formel d'un instrument auto-oscillant (anches-cordes frottées)



En rouge : grandeurs pour les instruments à cordes

En bleu : grandeurs pour les instruments à anche

SGA/SSA

J.P. Dalmont

24

Synthèse d'instruments à anche

- Synthèse temps réel par modèles physiques



Clarinette basse



Saxophone baryton

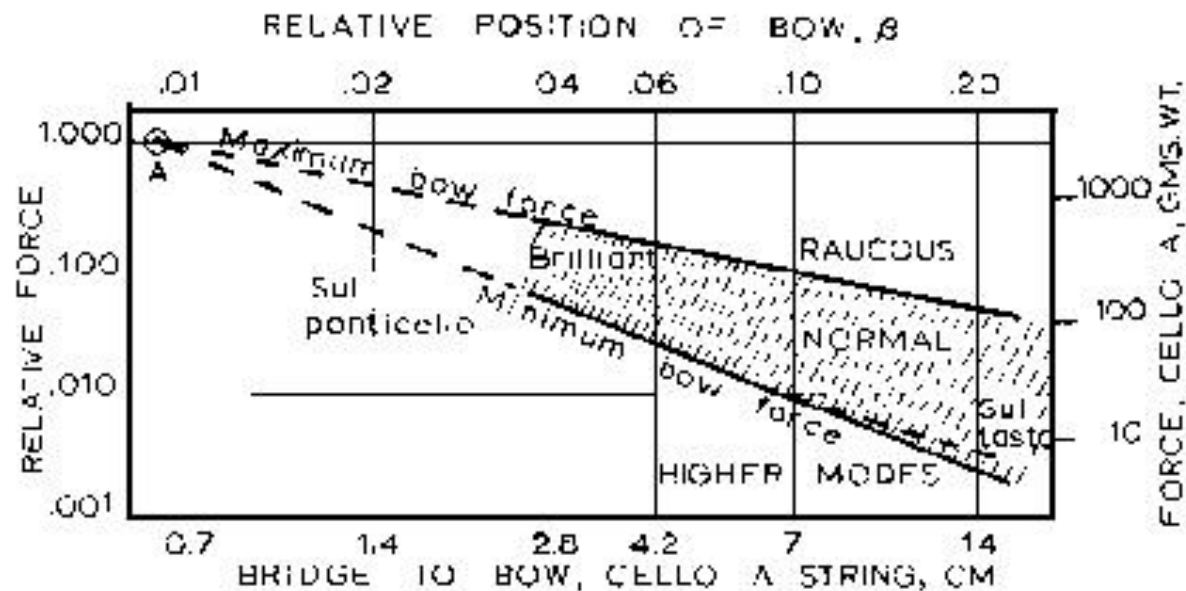


Saxophone ténor



Trompette

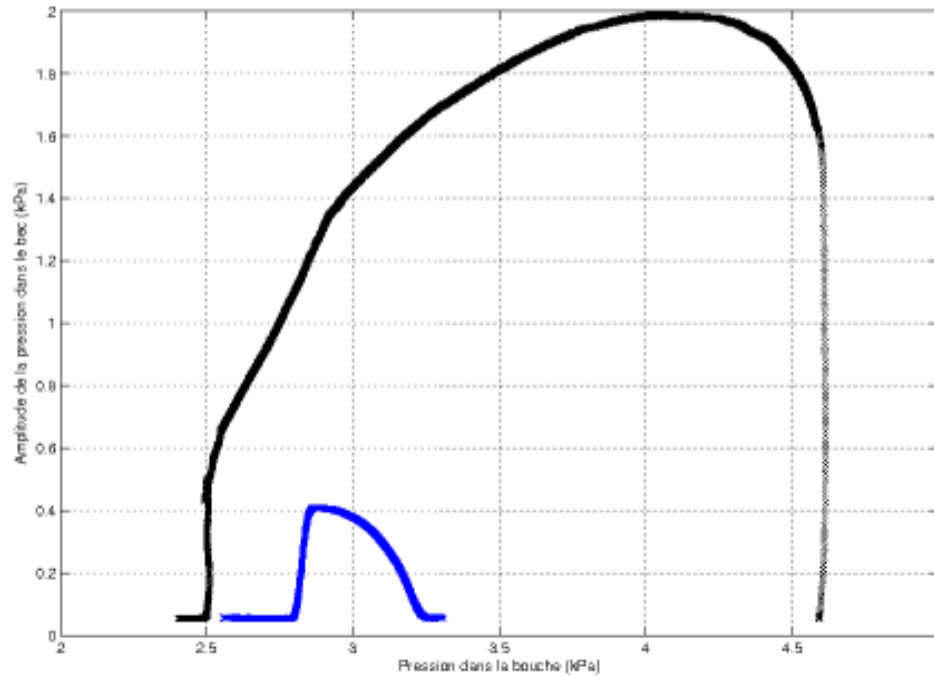
Instruments à cordes frottées



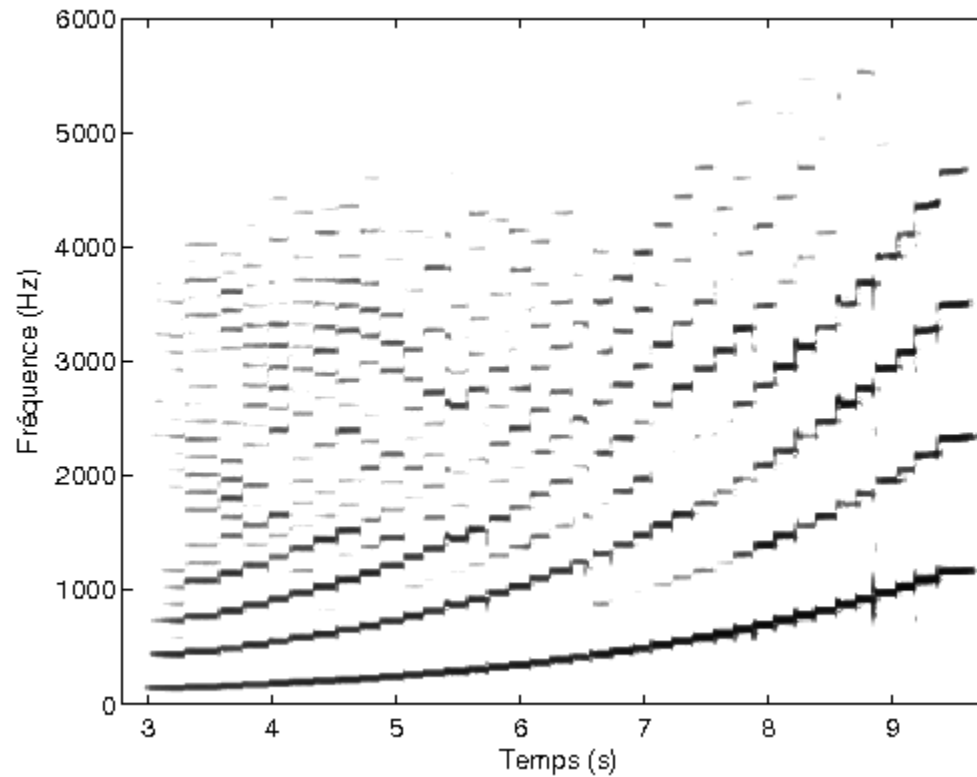
The Journal of the Acoustical Society of America

31

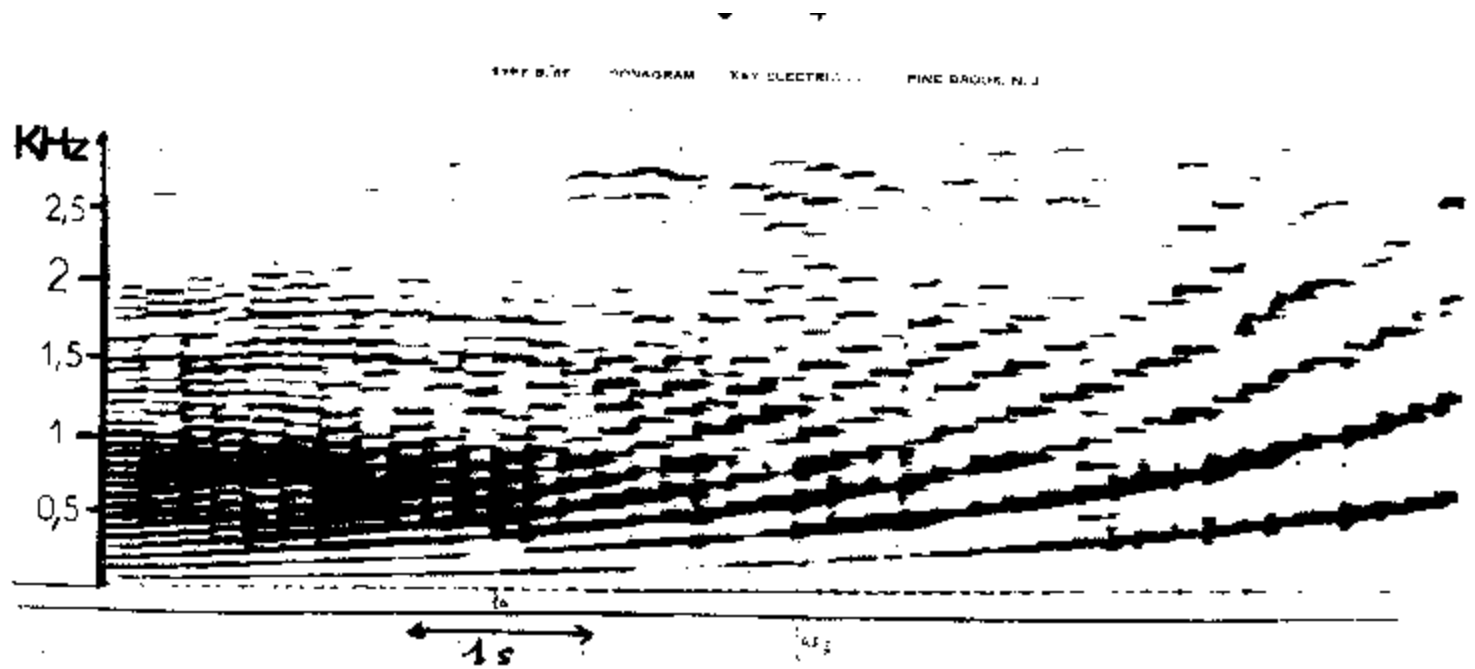
Bifurcation clarinette



Spectre clarinette



Spectre basse



Cuivres (J. Gilbert)



Cuivres de perce “coniques”



Cuivres de perce “cylindro – coniques”

Cuivres



Tuba wagnérien

Ophicléide

Saxhorn basse

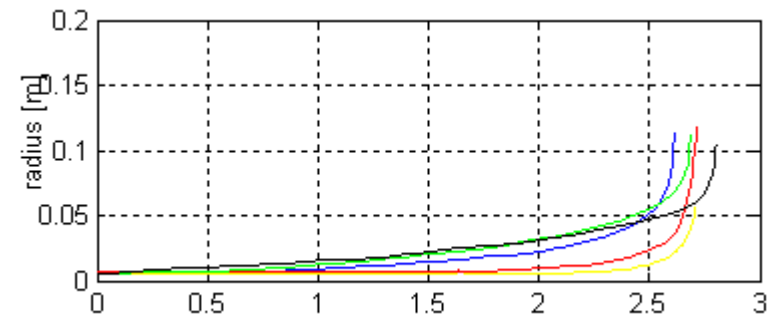
Tromb. basse

Tromb. ténor

SGA/SSA

Perce :

- géométrie de l'intérieur de l'instrument (cylindrique, conique, évasé, ...)



Cuivres

Sons « cuivrés » :

- sons très « timbrés » obtenus à fort niveau sonore (ff)

Conséquences d'un phénomène physique bien identifié :

- *propagation non linéaire = déformation au cours de sa propagation*



Qu'est-ce qui favorise les sons « cuivrés » :

- la longueur du tube

- la perce cylindrique
(distinction cuivres « clairs » et cuivres « doux »)
SGA/SSA



>



>



>



Les flûtes

- Pas d'élément solide vibrant
- Jet déstabilisé par la présence d'un résonateur

Flow visualisation
during starting transient
in a flute-like geometry

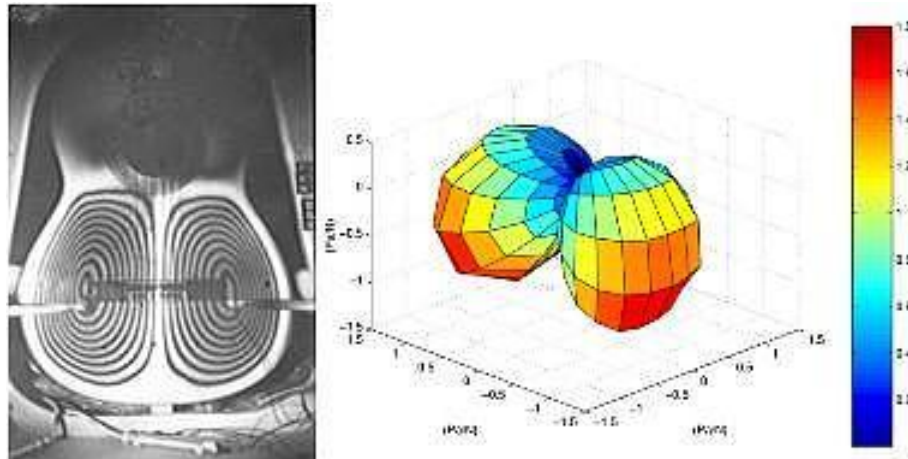
B. Fabre, F. Blanc
LAM-IJLRA
Université Pierre et Marie Curie

6400 i/s

Rayonnement

- Vibration des structures et/ou origine aéroacoustique (exemples)
- Puissance rayonnée
 - Dépend beaucoup de la fréquence
- Directivité des instruments

Exemple : rayonnement d'un mode dipolaire



Conclusions

- Ce qui permet de distinguer un instrument d'un autre (à hauteur et intensité égales)
 - mécanismes d'excitation
 - spectre (enveloppe spectrale)
 - enveloppe temporelle (montée, durée, extinction)
 - ...
- Des questions en suspens
 - dans la connaissance et les modèles d'instruments
 - prise en compte de l'instrumentiste
 - modèles 3D, non linéaires et inhomogènes
 - problèmes généraux de la mécanique : turbulence, lois de comportement non linéaires...
 - en synthèse sonore
 - en facture instrumentale et prise de son

Les instruments : objets d'études scientifiques ?

- Compréhension de l'**origine physique** des sons
- Guide pour la **facture instrumentale**
- Guide pour la **prise de son** et l'enregistrement
- Compréhension du fonctionnement mécanique par l'**instrumentiste**
- Compréhension des liens entre les paramètres de fabrication et la **perception** des sons
- Compréhension des liens entre les paramètres de jeu et les sons
- Développement d'outils pour la **synthèse sonore**

Facture instrumentale



- Intérêt de certaines modifications structurelles

- Utilisation de matériaux de substitution

