

Émergence des auto-oscillations dans un instrument de musique à anche simple

Fabrice Silva

sous la direction de

J. Kergomard, Ch. Vergez et Ph. Guillemain

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique & Université de Provence
Projet ANR Consonnes

7 décembre 2009

Plan

- 1 Contexte et motivations**
 - Des instruments à anche simple. . .
 - . . . aux manifestations de l'anche.
- 2 Simulation temporelle des auto-oscillations**
 - Décomposition modale d'un résonateur acoustique augmenté
 - MOREESC
- 3 Seuils d'oscillation des instruments à anche simple**
 - Étude théorique
 - Expérimentations
- 4 Conclusion et perspectives**

Plan

- 1 Contexte et motivations**
 - Des instruments à anche simple. . .
 - . . . aux manifestations de l'anche.
- 2 Simulation temporelle des auto-oscillations**
 - Décomposition modale d'un résonateur acoustique augmenté
 - MOREESC
- 3 Seuils d'oscillation des instruments à anche simple**
 - Étude théorique
 - Expérimentations
- 4 Conclusion et perspectives**

Les instruments à anche simple

Clarinettes
Saxophones
Cors de basset

Alboka (Pays Basque)
Birbyne (Pays baltes)
Xaphoon (Pacifique)

Une partie des cornemuses
Tárogató (Balkans)
Jeux d'anches (Orgues)...

- Association :

- d'un résonateur : la colonne d'air
- d'un excitateur :

une source de pression : bouche, pied (orgue),
poche (cornemuse), boîte à anche

une valve : l'anche (roseau, métal, plastique)



Les instruments à anche simple

Clarinettes
Saxophones
Cors de basset

Alboka (Pays Basque)
Birbyne (Pays baltes)
Xaphoon (Pacifique)

Une partie des cornemuses
Tárogató (Balkans)
Jeux d'anches (Orgues)...

- Association :

- d'un résonateur : la colonne d'air
- d'un excitateur :

une source de pression : bouche, pied (orgue),
poche (cornemuse), boîte à anche

une valve : l'anche (roseau, métal, plastique)



- Instruments à oscillations entretenues

Principe de fonctionnement

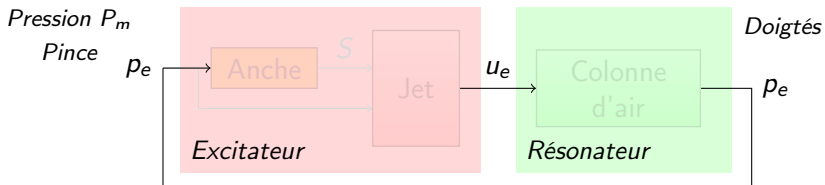
La valve permet l'injection cyclique d'énergie dans le résonateur.

La propagation de front d'ondes de surpression/dépression dans la colonne d'air provoque l'ouverture cyclique du canal d'anche.

L'entretien d'oscillation est possible par le renforcement de la surpression dans le bec par la forte pression dans la bouche quand le canal d'anche s'ouvre.



Un couplage multi-physique



Acoustique

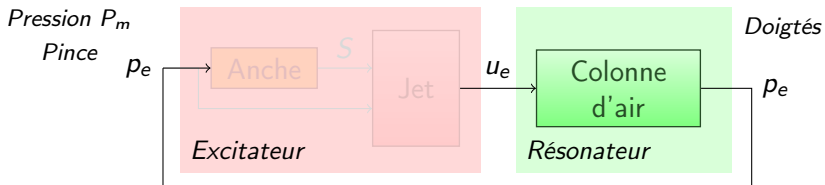
Colonne d'air caractérisée par son impédance d'entrée

Modèle de Raman appliqué au cylindre [Dalmont(2005)]

$$Z_e(\omega) = \frac{P_e(\omega)}{U_e(\omega)} = jZ_c \tan(\underline{k}L) \text{ avec } \underline{k} = \frac{\omega}{c} - j\alpha$$

Raffinements : pertes visco-thermiques, perce réelle...

Un couplage multi-physique



Acoustique

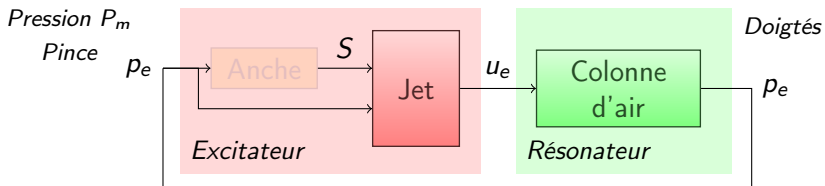
Colonne d'air caractérisée par son impédance d'entrée

Modèle de Raman appliqué au cylindre [Dalmont(2005)]

$$Z_e(\omega) = \frac{P_e(\omega)}{U_e(\omega)} = jZ_c \tan(\underline{k}L) \text{ avec } \underline{k} = \frac{\omega}{c} - j\alpha$$

Raffinements : pertes visco-thermiques, perce réelle . . .

Un couplage multi-physique



Mécanique des fluides

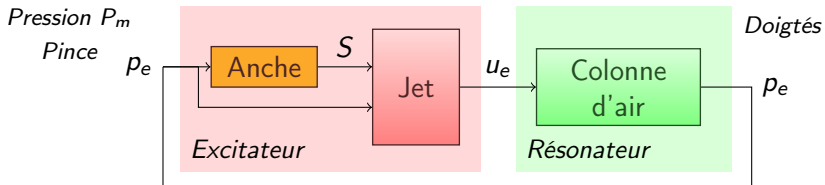
Formation d'un jet entrant dans l'instrument.

[Backus(1963)] Loi de puissance entre pression et débit,

[Hirschberg(1994)] Modèle de Bernoulli (simplifié) :

$$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{2} \rho v^2 = \Delta p \\ u_e = S \times v \end{array} \right\} \Rightarrow u_e = S \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

Un couplage multi-physique



Mécanique des solides

Anche : poutre de roseau

Simple raideur $S = S_0 - \Delta p/K$,

Caractérisations fréquentielles $D(\omega) = S(\omega)/\Delta P(\omega)$

[Facchinetti(2003), Guimezanes(2008)]

Système passe-bas résonnant du 2e ordre

Grandes vibrations : non linéaire [van Walstijn(2007)].

Une anche très (trop) impliquée

Une grande partie de la technique de l'instrumentiste provient de sa maîtrise de l'embouchure.

« *The Eb clarinet is the **Tasmanian Devil** of the woodwind family. Entirely **uncontrollable and unpredictable**, its **blunderbuss** like emissions can occur without warning. It is as much **a danger** to its owner as it is to the intended victim. For this reason the Eb clarinet is not in wide use today and only used by highly trained professionals and circus band daredevils. As the flute is to the piccolo, the Bb Clarinet is to the Eb Clarinet. The only time a Bb clarinet is considered **truly dangerous is in the hands of a saxophonist doubling on clarinet**. His seemingly lacking ability to adjust his air to the clarinet causes **a tone so forced and horrific** that decorum prevents me from continuing.* »

P. Kelly, compositeur

Expérimentation contrôlée

Une situation un peu plus gênante



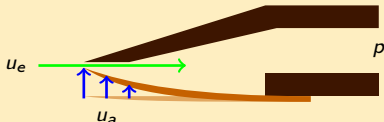
Causes possibles

Comportement fréquentiel non neutre

Solide déformable, soumis à des efforts surfaciques
⇒ Résonances plus ou moins amorties par le musicien

Débit d'anche

Induit par le mouvement propre de l'anche

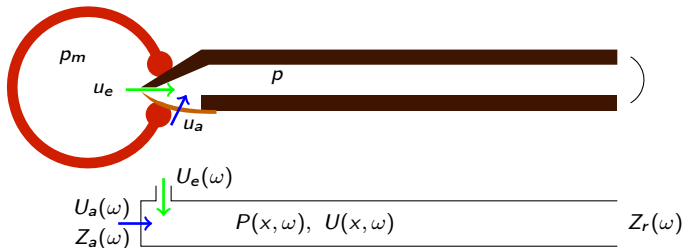


Ces phénomènes permettent-ils d'expliquer l'émergence d'oscillations de haute fréquence ?

Plan

- 1 Contexte et motivations
 - Des instruments à anche simple. . .
 - . . . aux manifestations de l'anche.
- 2 **Simulation temporelle des auto-oscillations**
 - Décomposition modale d'un résonateur acoustique augmenté
 - MOREESC
- 3 Seuils d'oscillation des instruments à anche simple
 - Étude théorique
 - Expérimentations
- 4 Conclusion et perspectives

Inclusion du débit d'anche dans le résonateur



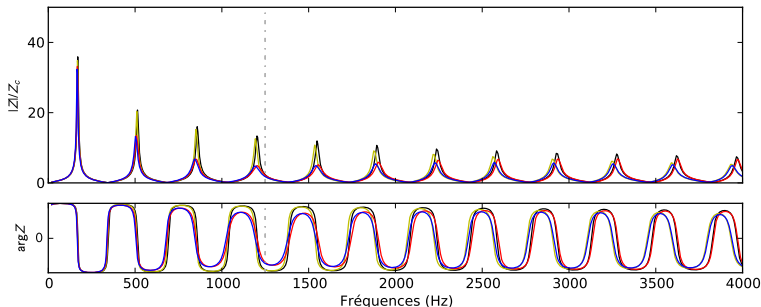
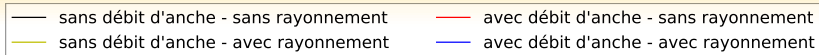
Propagation 1D d'ondes planes avec pertes visco-thermiques

Condition de débit d'anche : $P(0, \omega) = Z_a(\omega)U(0, \omega)$

Condition de rayonnement : $P(L, \omega) = Z_r(\omega)U(L, \omega)$

Source de débit $u_e(t)$ en $x_s \rightarrow 0$ (« Bernoulli »)

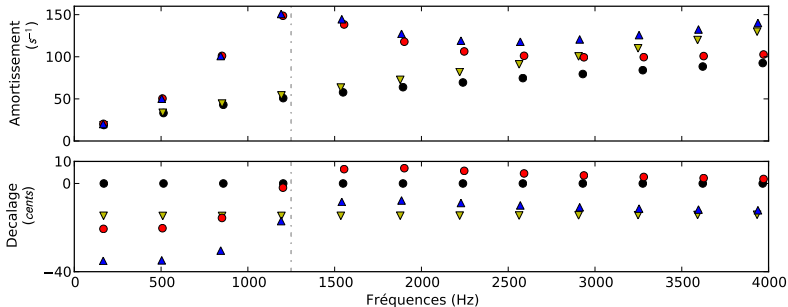
Impédance d'entrée du résonateur augmenté



Le rayonnement et le débit d'anche modifient de manière non négligeable l'impédance d'entrée du résonateur augmenté. Leur prise en compte est nécessaire avec des conséquences potentielles sur la **justesse** et le **spectre** sonore.

Fréquences propres complexes

- sans débit d'anche - sans rayonnement
- avec débit d'anche - sans rayonnement
- ▼ sans débit d'anche - avec rayonnement
- ▲ avec débit d'anche - avec rayonnement



Rayonnement : correction de longueur (r) et amortissement HF.

Débit d'anche : correction de longueur dépendante de la fréquence et fort amortissement près de la résonance d'anche.

Décomposition modale et simulation

Impédance et pression décomposées

$$Z_e(\omega) = \frac{P_e(\omega)}{U_e(\omega)} = \sum_n \frac{C_n}{j\omega - s_n} + \frac{C_n^*}{j\omega - s_n^*}$$

$$p_e(t) = \sum_n 2\text{Re}(p_n(t)) \text{ avec } \frac{dp_n}{dt} + s_n p_n(t) = C_n u_e(t)$$

Ouverture du canal d'anche : passe-bas 2e ordre entre p_e et S
 Débit source : fonction non linéaire de p_e et S (« Bernoulli »).
 Évolution temporelle du système couplé par résolution d'EDO

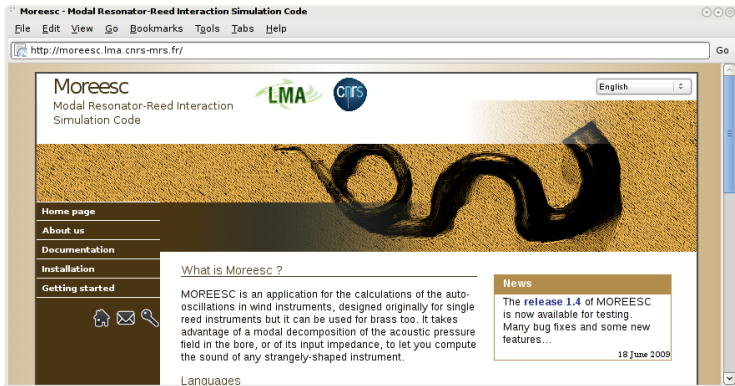
$$\dot{\underline{Y}} = f(\underline{Y}, t) \text{ avec } \underline{Y}(t) = [p_1, \dots, p_n, S]$$

Méthode de calcul comparée à Harmbal pour le régime permanent et à la synthèse en transitoire [ICA, 2007]. Validation énergétique de la résolution des EDO à faire.

MOREESC : MOfdal resonator REEd interaction Simulation Code

Librairie logicielle de simulation des instruments auto-oscillants

<http://moreesc.lma.cnrs-mrs.fr> - distribué sous licence CECILL.



The screenshot shows a web browser window with the title "Moreesc - Modal Resonator-Reed Interaction Simulation Code". The address bar contains "http://moreesc.lma.cnrs-mrs.fr". The website header includes the "Moreesc" logo, the text "Modal Resonator-Reed Interaction Simulation Code", and logos for "LMA" and "CNRS". A language dropdown menu is set to "English". The main content area features a large image of a reed instrument's bore with a dark, wavy pattern. A sidebar on the left contains navigation links: "Home page", "About us", "Documentation", "Installation", and "Getting started", along with icons for home, email, and search. The main text area has a heading "What is Moreesc ?" followed by a paragraph: "MOREESC is an application for the calculations of the auto-oscillations in wind instruments, designed originally for single reed instruments but it can be used for brass too. It takes advantage of a modal decomposition of the acoustic pressure field in the bore, or of its input impedance, to let you compute the sound of any strangely-shaped instrument." Below this is a "Languaades" link. A "News" box on the right contains the text: "The **release 1.4** of MOREESC is now available for testing. Many bug fixes and some new features..." dated "18 June 2009".

MOREESC : MOdal resonator REEd interaction Simulation Code

Modules de définition du système, de calcul et de post-traitement.

Documentation : <http://moreesc.lma.cnrs-mrs.fr/doc>

Moreesc v1.5 Manual (DRAFT) » next | modules | index

Welcome to Moreesc's documentation

MOREESC is an application for the calculations of the auto-oscillations in wind instruments, designed originally for single reed instruments but it would be usable for brass too. It takes advantage of a modal decomposition of the acoustic pressure field in the bore, or of its input impedance, to let you compute the sound of any strangely-shaped instrument.

This document is intended to be used as a reference guide, but also be read as a long and detailed tutorial as the useful functions and class are also sequentially described here.

- **Acoustique** – Acoustic (not so) constants
- **Resonateur** – Specifying the acoustical resonator
- **DecompositionModale** – Reed
- **Profils** – Time-varying functions
- **Solveur_dim** – Time-domain simulation
- **SimuTempo** – System definition
- **AnalyseLineaireStabilite** – Linear Stability Analysis
- Some things that need to be done...

Table Of Contents

Welcome to Moreesc's documentation

- Indices and tables

Next topic

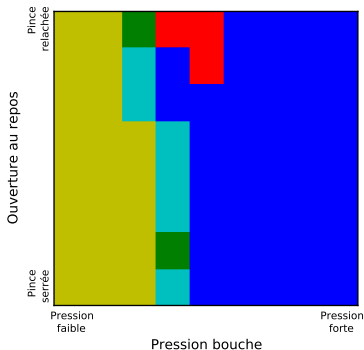
Acoustique – Acoustic (not so) constants

This Page

Show Source

Quick search

Exploration des régimes de jeu



Comme pour l'instrument réel, la maîtrise de l'instrument virtuel demanderait un apprentissage.

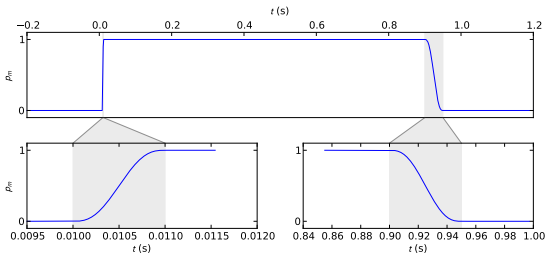
- Oscillation non entretenue
- Régime chalumeau
(1e pic de résonance acoustique)
- Régime clairon
(2e pic de résonance acoustique)
- Transition chalumeau → clairon
- Régime quasi-périodique

et aussi

Canard

Temps d'émergence de l'oscillation

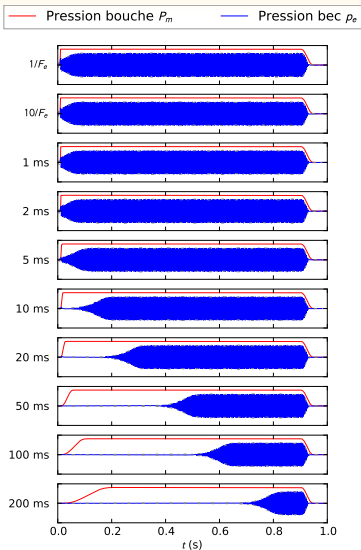
Paramètres de contrôle (pression buccale et pince) variables dans le temps.



Maîtrise du geste instrumental & Qualité de l'attaque

Influence du temps de montée de la pression dans la bouche sur l'établissement de l'auto-oscillation ?

Temps d'émergence de l'oscillation



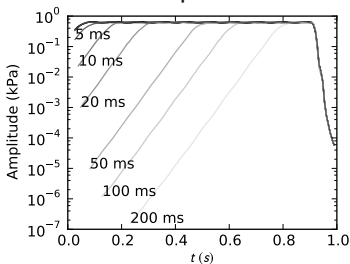
Retard apparent au démarrage.



Amplitude des oscillations :

$$A(t) = A_0 e^{\alpha t}$$

α identique pour toutes les montées,
 A_0 fonction du temps de montée de P_m



Plan

- 1 **Contexte et motivations**
 - Des instruments à anche simple. . .
 - . . . aux manifestations de l'anche.
- 2 **Simulation temporelle des auto-oscillations**
 - Décomposition modale d'un résonateur acoustique augmenté
 - MOREESC
- 3 **Seuils d'oscillation des instruments à anche simple**
 - Étude théorique
 - Expérimentations
- 4 **Conclusion et perspectives**

Méthodologie : analyse linéaire de stabilité

- Étude des valeurs propres du jacobien du système couplé (Moreesc)
- Recherche de l'oscillation juste entretenue (bifurcation de Hopf) :
Linéarisation des non-linéarités au point de fonctionnement variable
Résolution en (P_m, ω) de l'équation caractéristique (complexe)

$$Z_e(\omega)^{-1} + \frac{j\omega \Delta I_a}{cZ_c} D(\omega) = \frac{1}{K_a} \sqrt{\frac{2P_m}{\rho}} \left(D(\omega) - \frac{K_a S_0 - P_m}{2P_m} \right)$$

- **Impédance d'entrée (mesurée sans anche)**
 - Admittance liée au débit d'anche
 - Comportement linéarisé de l'excitateur (avec dynamique d'anche)

Méthodologie : analyse linéaire de stabilité

- Étude des valeurs propres du jacobien du système couplé (Moreesc)
- Recherche de l'oscillation juste entretenue (bifurcation de Hopf) :
Linéarisation des non-linéarités au point de fonctionnement variable
Résolution en (P_m, ω) de l'équation caractéristique (complexe)

$$Z_e(\omega)^{-1} + \frac{j\omega \Delta I_a}{cZ_c} D(\omega) = \frac{1}{K_a} \sqrt{\frac{2P_m}{\rho}} \left(D(\omega) - \frac{K_a S_0 - P_m}{2P_m} \right)$$

- Impédance d'entrée (mesurée sans anche)
- Admittance liée au débit d'anche
- Comportement linéarisé de l'excitateur (avec dynamique d'anche)

Méthodologie : analyse linéaire de stabilité

- Étude des valeurs propres du jacobien du système couplé (Moreesc)
- Recherche de l'oscillation juste entretenue (bifurcation de Hopf) :
Linéarisation des non-linéarités au point de fonctionnement variable
Résolution en (P_m, ω) de l'équation caractéristique (complexe)

$$Z_e(\omega)^{-1} + \frac{j\omega \Delta I_a}{cZ_c} D(\omega) = \frac{1}{K_a} \sqrt{\frac{2P_m}{\rho}} \left(D(\omega) - \frac{K_a S_0 - P_m}{2P_m} \right)$$

- Impédance d'entrée (mesurée sans anche)
- Admittance liée au débit d'anche
- **Comportement linéarisé de l'excitateur (avec dynamique d'anche)**

Sans dynamique d'anche $D = 1$ sans débit d'anche $\Delta l_a = 0$

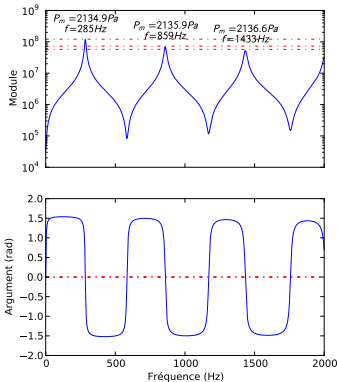
$$Z_e(\omega) = \frac{\sqrt{2P_m\rho}}{3P_m - K_a S_0} = f(P_m)$$

Approche graphique :
intersection de la courbe $Z_e(\omega)$ avec
le niveau $f(P_m)$

Oscillation sur la fréquence de la
plus forte résonance avec

$$P_m = \frac{K_a S_0}{3} + \varepsilon(Z_e)$$

Résistance négative
& Compensation des pertes



Résonance d'anche fortement amortie

[Wilson et Beavers, 1974]

Niveau $f(P_m) \rightarrow$ Courbe $f(P_m, \omega)$

Déphasage de l'anche

\Rightarrow Déphasage de l'excitateur

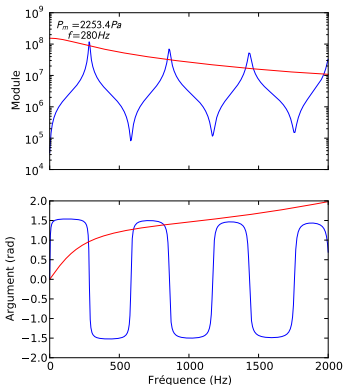
\Rightarrow Déviation en fréquence par rapport à la résonance.

L'oscillation est supportée par une impédance plus faible

Seuil plus élevé que pour le cas

$$D = 1$$

$$P_m \gg \frac{K_a S_0}{3}$$



Résonance d'anche fortement amortie

[Wilson et Beavers, 1974]

Niveau $f(P_m) \rightarrow$ Courbe $f(P_m, \omega)$

Déphasage de l'anche

\Rightarrow Déphasage de l'excitateur

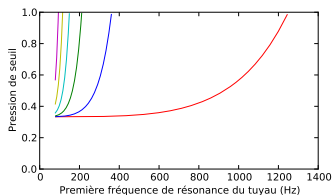
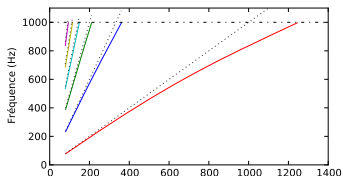
\Rightarrow Déviation en fréquence par rapport à la résonance.

L'oscillation est supportée par une impédance plus faible

Seuil plus élevé que pour le cas

$$D = 1$$

$$P_m \gg \frac{K_a S_0}{3}$$



Résonance d'anche faiblement amortie

Anche faiblement amortie

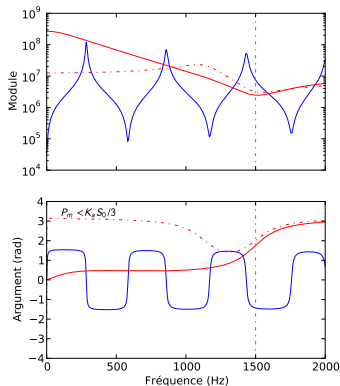
Déphasage localisé au voisinage de la résonance d'anche.

Déviations en fréquence plus faibles.

Solutions $P_m < K_a S_0 / 3$

Oscillation haute fréquence à faible pression de seuil.

Interaction avec la résonance acoustique la plus proche de la résonance d'anche.



Une anche faiblement amortie donne facilement naissance à des sons associés aux régimes supérieurs de l'instrument.

Résonance d'anche faiblement amortie

Anche faiblement amortie

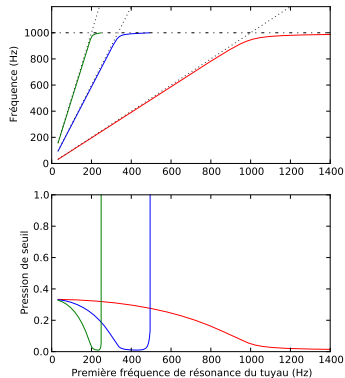
Déphasage localisé au voisinage de la résonance d'anche.

Déviations en fréquence plus faibles.

Solutions $P_m < K_a S_0 / 3$

Oscillation haute fréquence à faible pression de seuil.

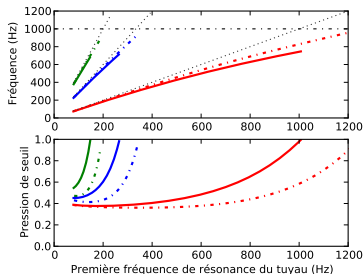
Interaction avec la résonance acoustique la plus proche de la résonance d'anche.



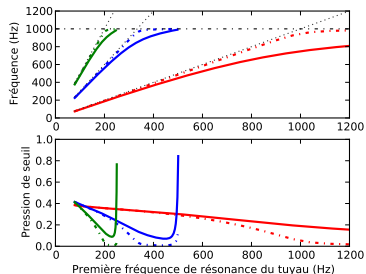
Une anche faiblement amortie donne facilement naissance à des sons associés aux régimes supérieurs de l'instrument.

Apport du débit d'anche

- - - Sans débit d'anche - Anche fortement amortie
 — Avec débit d'anche - Anche fortement amortie



- - - Sans débit d'anche - Anche faiblement amortie
 — Avec débit d'anche - Anche faiblement amortie



En confirmation des résultats de l'étude des pôles, le débit d'anche introduit une déviation en fréquence qui s'ajoute à celle due à l'amortissement et réhausse les pressions de seuils. La notion de sélectivité du régime d'oscillation par l'anche faiblement amortie est toujours visible.

Confrontation expérimentale : démarche

Comparer les seuils théoriques aux seuils mesurés sur bouche artificielle.

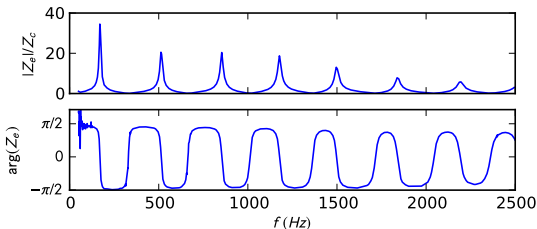
- Mesures de seuils d'oscillation sur la bouche artificielle

Besoin d'avoir accès à des valeurs de paramètres représentatives des conditions expérimentales.

$$Z_e(\omega)^{-1} + \frac{j\omega \Delta l_a}{cZ_c} D(\omega) = \frac{1}{K_a} \sqrt{\frac{2P_m}{\rho}} \left(D(\omega) - \frac{K_a S_0 - P_m}{2P_m} \right)$$

- Impédance acoustique du corps de l'instrument
- Paramètre de débit d'anche
- Comportement dynamique de l'anche
- Comportement dynamique de l'excitateur non linéaire

Impédance $Z_e(\omega)$ du résonateur acoustique



Capteur d'impédance conçu au LAUM/CTTM

Géométrie du bec problématique pour la mesure de l'impédance associée au mode plan \Rightarrow Volume équivalent.

Autres pistes explorées :

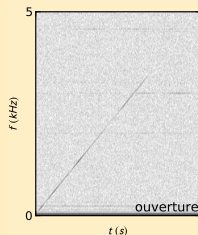
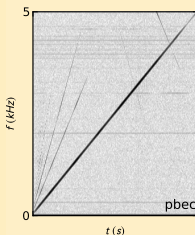
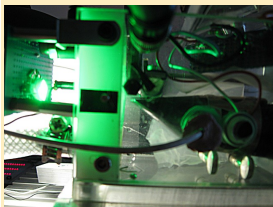
- Ajustement du volume **et** de la masse acoustique
- Mesure sur le bec réel.



Dynamique d'anche : anche en configuration de jeu

Excitation acoustique aval.

Mesure de la pression dans le bec et de l'ouverture du canal d'anche.

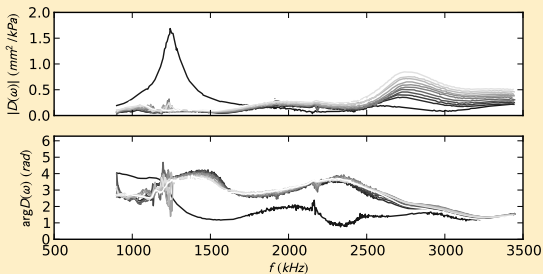


Traitement temps-fréquence de suivi de chirp

Débit de l'anche

Méthode de la puissance réactive [Boutillon, 1996]
avec ajout de la dynamique d'anche.

Dynamique d'anche : anche en configuration de jeu



Effet de la lèvre sur la dynamique de l'anche.

Pertinence de la modélisation par un oscillateur à 1 ddl ?

Débit de l'anche

Méthode de la puissance réactive [Boutillon, 1996]
avec ajout de la dynamique d'anche.

Caractérisation de l'excitateur I

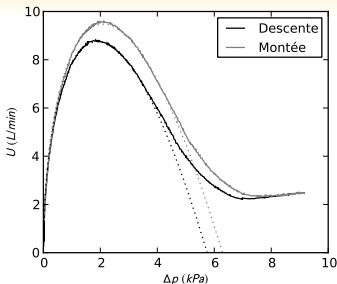
Approche classique :

mesure de la caractéristique

$$u_e = f(\Delta p)$$

Pente : « gain » de l'excitateur.

- Écarts au modèle de Bernoulli
Fuites et « hystérésis »
- **Absence de dynamique**

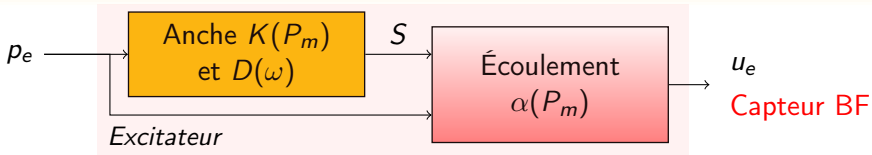


Approche « Boîte noire »

Ne plus chercher à estimer des paramètres du modèle.

Procéder à une identification de la dynamique de l'excitateur sans faire d'hypothèses sur l'écoulement

Caractérisation de l'excitateur II



- Caractéristique statique débit-pression : pente $\alpha(P_m)$
- Caractéristique statique ouverture-pression : pente $K(P_m)$
- Caractéristique dynamique ouverture-pression $D(\omega)$

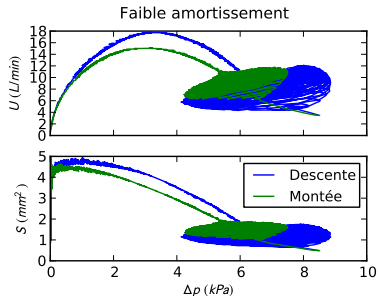
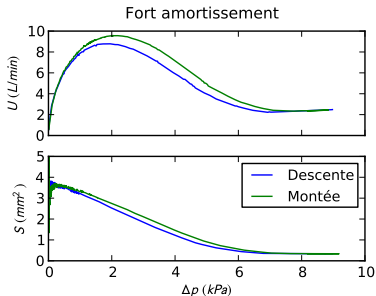
Apport de la dynamique d'anche à l'admittance de l'excitateur

$$Y_{exc}(\omega, P_m) = \alpha(P_m) + (D(\omega) - K(P_m)) \frac{u_e(P_m)}{S(P_m)}$$

Caractéristiques statiques

Rampes de pression dans la bouche artificielle.

Charge acoustique fortement résistive en aval du bec



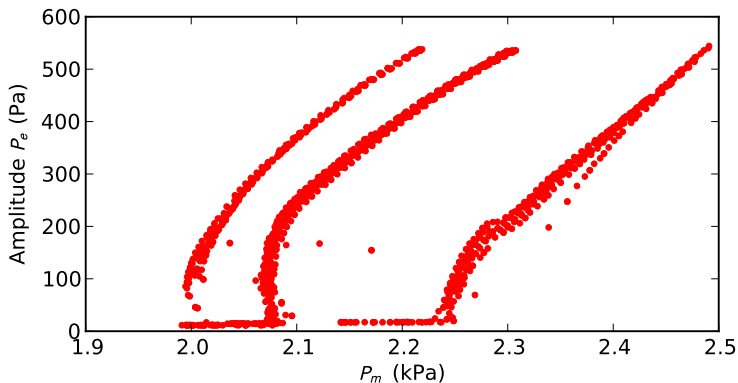
Limitation de la méthode usuelle de mesure quasi-statique.
 L'auto-oscillation guidée par une résonance d'anche est possible.
 Réflexion en cours : compensation de pôles dans l'asservissement.

Mesure de seuils d'oscillation

Régulation de pression dans la bouche.

Processus à contrôler particulièrement complexe.

Les oscillations de très petite amplitude deviennent accessibles.



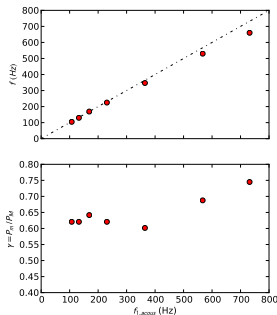
Mesure de seuils d'oscillation

Régulation de pression dans la bouche.

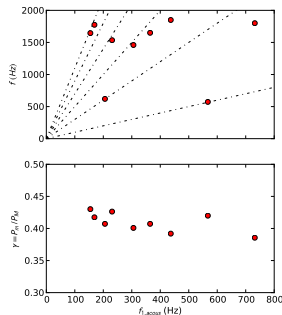
Processus à contrôler particulièrement complexe.

Les oscillations de très petite amplitude deviennent accessibles.

Anche fortement amortie



Anche faiblement amortie



Confrontation et incertitudes

Incertitude sur le seuil mesuré

[Incertitude sur la pression P_m mesurée]

+ [Amplitude de l'oscillation : nature de la bifurcation]

Incertitude sur le seuil estimé par la théorie

[Mesures des grandeurs utiles]

+ [Paramétrisation]

Question du principe de la séparabilité résonateur/excitateur

Le sujet d'étude (fréquence **et** seuil de pression de l'émergence des oscillations, notamment des canards) ne permet pas de se contenter de caractérisation partielle des éléments (pics de résonance de l'instrument, déphasage de l'anche, etc. . .)

Plan

- 1 **Contexte et motivations**
 - Des instruments à anche simple. . .
 - . . . aux manifestations de l'anche.
- 2 **Simulation temporelle des auto-oscillations**
 - Décomposition modale d'un résonateur acoustique augmenté
 - MOREESC
- 3 **Seuils d'oscillation des instruments à anche simple**
 - Étude théorique
 - Expérimentations
- 4 **Conclusion et perspectives**

Conclusion et perspectives I

Volet expérimental

- Confrontation des seuils à portée de main.
Exploiter au maximum les mesures brutes sans ajuster de modèles.
- La modélisation avancée a mené à des réflexions sur de **nouveaux protocoles expérimentaux**, à la spécification de cahier des charges et au développement de l'**instrumentation et le contrôle de la bouche artificielle**.
- Mise au point d'un **capteur d'ouverture** du canal d'anche.
Déjà adapté à la mesure sur musicien.
Utilisation pour l'asservissement de la pince ?
- Dispositif de **mesure de dynamique d'anche** (pression-ouverture)

Conclusion et perspectives II

Volet théorique

- Notion de **sélectivité du régime d'oscillation par l'amortissement** de l'anche
- Importances relatives de la prise en compte du rayonnement, de la dynamique d'anche et du débit d'anche
Plusieurs **contributions à la déviation en fréquence** :
pas de quantification du débit d'anche par comparaison entre longueur du résonateur et fréquence d'oscillation.
Pertinence des études approfondies sur le résonateur acoustique (tout au moins à l'échelle considérée).
- L'approche modale du résonateur augmenté fournit un **formalisme très aisément réutilisable**.

Conclusion et perspectives III

Volet numérique

Outil de calcul

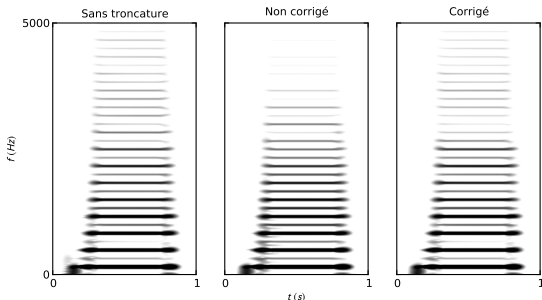
- **à la disposition de la communauté,**
- **extensible** : conduit vocal (déjà fait, à la manière de Fritz(2004)), cuivres (très prochainement), valve à plusieurs résonances, profils temporels pour tous les coefficients, etc. . .
- **modulaire** : modules de post-traitement, version synthèse (la méthode d'intégration peut être changée facilement).
- encore **à explorer** !
Utilisation de grandeurs mesurées sur musicien, manipulations modales comme aide à la facture, etc. . .
Chaînon manquant entre
 - les méthodes classiques d'analyse des systèmes dynamiques et
 - le comportement réel en commande variable.

Merci de votre attention !

Ordre de troncature de la décomposition modale

Approche énergétique à la manière des **Modes Propres Orthogonaux** (B. Vial, S. Bellizzi et Ch. Vergez).

Terme correctif modélisant l'effet des modes supérieurs sur les pics d'admittance, la décroissance HF, sur la réponse instantanée :



Sans correction
Avec correction

Débit d'anche

La relation entre la pression dans le bec débit d'anche ne peut être considéré comme linéaire qu'en régime d'anche non battante.

Quand le mouvement de l'anche est limité par le contact avec les bords de la lumière du bec, le débit d'anche devient une fonction non linéaire de la pressions p_e et l'impédance terminale $Z_d(\omega)$ n'a plus de sens.

Décomposition modale du résonateur sans débit d'anche.

Débit source = débit Bernoulli + débit d'anche

Extension aux cuivres (anches lippales)

Anche en-dehors

Le canal s'ouvre quand P_m augmente.
 p_e et S : opposition de phase (en BF)
Cas dual de l'anche simple.

Le déphasage de l'excitateur induit une déviation de la fréquence émergente vers les aigus.

Émission facilitée par la proximité de résonances acoustiques.

