

## Sources acoustiques : matériaux, géométrie et non-linéarités. De la conception à la perception

Antoine Chaigne

Séminaire UME/LAMSID  
10 novembre 2010

1

## Objectif de l'exposé

- **Tentative de synthèse des travaux menés à l'UME en acoustique depuis 2003**
- **Résultats issus des thèses de :**
  - Christophe Stoelinga (2007)
  - Nicolas Quaegebeur (2007)
  - Petr Sidlof (2007)
  - Kevin Arcas Castillo (2009)
  - Virginie Delavaud (2010)
  - Juliette Chabassier (en cours – soutenance 2011)
- **..et de travaux menés en commun avec :**
  - Olivier Coutier et Jean-François Devillers (2004-06)
  - Stephen McAdams (Univ. McGill) et V. Roussarie (PSA) (2000-10)

2

## Objets des recherches

- **Compréhension des mécanismes de génération du son**
  - sources d'origine vibratoire (roulements, HP, plaques, piano,...)
  - interaction fluide-structure (cordes vocales)
- **Identification des propriétés des sources impliquées dans ces mécanismes**
  - matériaux
  - géométrie
  - non-linéarités (amplitude)
- **Développer des modèles physiques de sources**
  - soumis à validation expérimentale
  - soumis à validation auditive (modèles temporels)

3

## Applications

- **Synthèse sonore**
  - applications musicales (piano)
  - psychoacoustique (barres, plaques, amortissements, roulements...)
- **Transports**
  - qualité sonore des véhicules (bruits de roulements, HP)
  - sonorisation (HP, reverberateur)
  - maintenance (rugosité voies)
- **Facture et procédés de fabrication de sources**
  - instruments de musique (piano)
  - haut-parleurs

4

## Thèmes abordés

1. **Vibroacoustique de sources « complexes »**
  - **complexité** : géométrie, matériau, non-linéarités, multiphysique
  - exemple : **haut-parleurs**
2. **Audio, perception et acoustique musicale**
  - **complexité** : description physique fine des structures, qualité sonore
  - liens entre paramètres physiques de source et perception (« psychomécanique »)
  - ex : **réverbérateur, impacts sur barres et plaques, piano**
3. **Roulements et transports**
  - **complexité** : diversité des régimes vibratoires, différentes échelles d'espace (rugosité/longueur de voie) et de vitesse
  - ex : **bille/plaque et roue/rail**
4. **Fluides et structures**
  - **complexité** : frontières mobiles, équations fluides et couplages
  - ex : **cordes vocales et son de biseau**

5

## Thème 1: Vibroacoustique de sources complexes Questions posées et résultats obtenus

- Développement d'un modèle vibratoire et acoustique **large bande** (20 Hz-20 kHz)
- Identification, hiérarchisation et modélisation des causes de **distorsion**
- « **Optimisation** » géométrie/matériau pour des structures hybrides axisymétriques
- Effet de la **courbure** sur le rayonnement acoustique
- Refs: JSV07 ; JAES08 ; AA10.

6

# Thème 1 : illustrations

- **Courbes de réponse** vitesse et pression large bande
- **Taux de distorsion** en fonction de la fréquence
- « **Optimisation** » forme/matériau
- **Directivité** fonction de la courbure
- **Application** : prototype GL (Laum)

7

# Modèle vibratoire large bande d'un HP

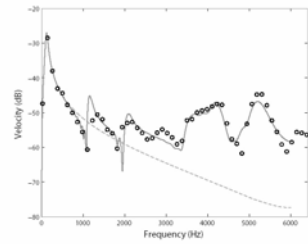
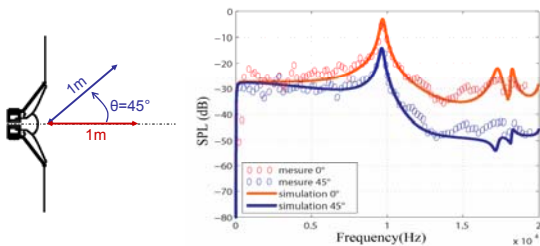


Figure 3: Comparison between measurements of the velocity at the center (points) and the results of the simulation (solid lines). Dotted line stands for the Thiele and Small model (one degree of freedom) and solid line represents the solution obtained with the use of 6 modes of vibration. The presented model allows to predict accurately the velocity of the structure below 6 kHz (when the low frequency model is only valid below 600 Hz).

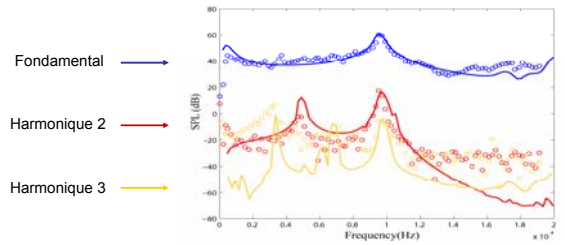
8

# Réponses en fréquence d'un HP électrodynamique



9

# Taux de distorsion d'un HP électrodynamique



10

# « Optimisation » forme-matériau d'un HP

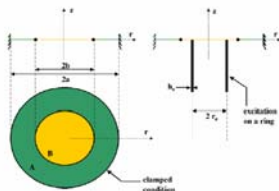


Fig. 1. (Left) Geometry of the system under study. (Right) A typical example of studied loading. Both structures A and B have different material properties and the junction is supposely lossless.

11

# « Optimisation » forme-matériau

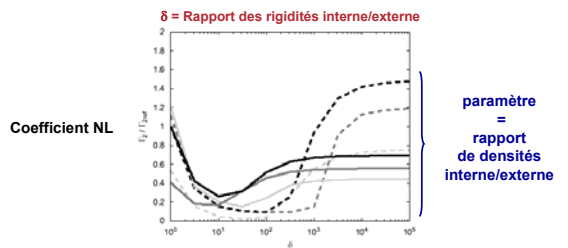


Fig. 6. Evolution of the second nonlinear coefficient  $F_{222}$  with respect to the flexural rigidity ratio between outer and inner structures  $\delta$  for different values of density ratio  $\sigma$ . Black lines represent the case where  $\sigma = 0.1$ , dark gray lines for when  $\sigma = 1$  and light gray lines for when  $\sigma = 10$ . The results are normalized by the value  $F_{222}$  obtained in the limiting case where  $\delta = \sigma = 1$ . The dashed curves (---) stand for the case  $\sigma = 0.9$  and the solid curves for the case  $\sigma = 0.7$ . A minimum is reached when  $10^{-1} < \delta < 100$  depending on the geometrical ratios.

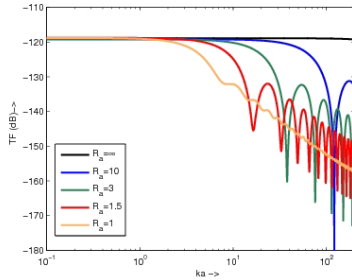
12

## Influence de la courbure sur la réponse en fréquence en champ lointain dans l'axe de la coque

$$R_a = \frac{R}{a}$$

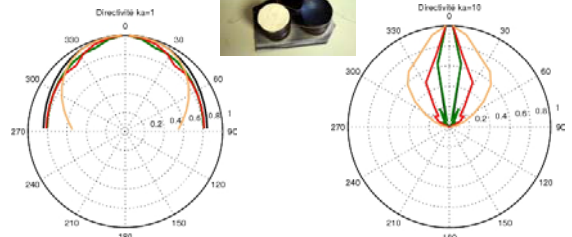


La courbure réduit la bande passante



13

## Influence de la courbure sur la directivité de la coque



La courbure élargit le cône de directivité en HF

14

## Thème 2 : audio et acoustique musicale Questions et résultats obtenus

- Réverbérateur
    - Développement d'un réverbérateur à plaque « tout numérique »
    - Compréhension du rôle du matériau dans la qualité sonore du réverbérateur
  - Impacts sur barres et plaques
    - identification de la célérité  $c_L = \sqrt{E/\rho}$  et de l'amortissement comme paramètres physiques principaux dans la perception des impacts
  - Piano (en cours)
    - Développement d'un modèle général de cordes raides couplées non linéaires
    - Compréhension des conditions de couplage au chevalet
- Refs : Jasa 04, Jasa10, AA10 et CMAME10 ;

15

## Réverbérateur à plaque



Fig. 1. Exciter (E) and accelerometers (O1 and O2) setup in the stereo EMT140-st unit.

16

## Réverbérateur – matériau optimal -

- Equation du mouvement de la plaque

$$\partial^2 \ddot{u} = -\tilde{\kappa}^2 \nabla^2 u, \quad \text{where } \tilde{\kappa}^2 = \lambda^2 \left( 1 + \frac{R_1}{s + C_1 R_1} \right); \quad R_1 = \frac{\alpha}{\beta} \frac{\rho T_0}{\rho C_p}, \quad C_1 = \frac{K_1 \alpha^2}{\rho C_p} \quad (16)$$

These equations are written in the Laplace domain, where a multiplication by the Laplace variable  $s$  represents a partial derivative versus time.  $\tilde{\kappa}^2$  is the complex stiffness parameter.  $\alpha = \frac{\partial \ln E}{\partial \ln T_0}$  is the thermal coefficient.  $T_0$  is the absolute temperature.  $C_p$  is the specific heat at constant strain,  $K_1$  is the thermal conductivity and  $\alpha_{th}$  is the coefficient of thermal expansion.

- Choix « optimal » du matériau

Table 3  
Thermoelastic parameters of a 18  $\mu\text{m}$  plate of different materials.

	Steel 1	Steel 2	Gold	Silver	Copper	Aluminum
$R_1/C_1$	62.9	52.1	3.72	5.00	4.96	10.2

17

## « Psychomécanique » de barres impactées

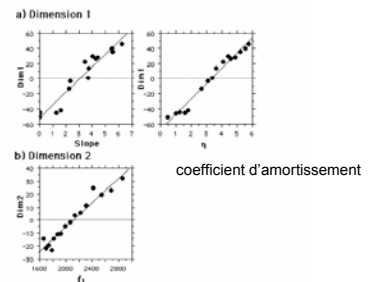


FIG. 5. Experiment 1. Linear regressions of coordinates along one dimension of the perceptual space onto signal descriptors of mechanical parameters. (a) Dimension 1 compared to  $\text{Slop}_{\text{SCC}}$  and  $f_1$ . (b) Dimension 2 compared to  $f_1$ .

18

## Cas des plaques : identification auditive du matériau

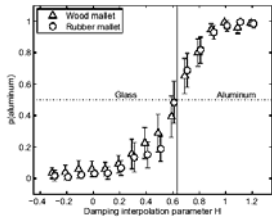


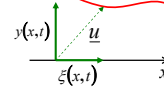
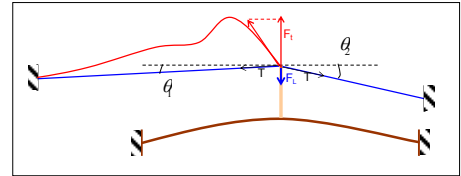
FIG. 7. Population probability of the "aluminum" response as a function of the damping interpolation parameter  $H$ . Error bars bracket 95% confidence intervals for the "aluminum" response distribution across participants. The vertical line represents the value of  $H$  at which "aluminum" and "glass" responses are equiprobable, corresponding to the average of the estimates obtained from the rank-regression modeling of participant-specific data, with  $H$  as predictor. Data for the wood and rubber sets have been displaced slightly along the abscissa for ease of visualization.

TABLE II. Interpolation and extrapolation functions used to construct the hybrid materials.

Values of $H$	Complex rigidity model	Simulated material
$H < 0$	$\tilde{\mu} = (1 - H)\tilde{\mu}_g$	Ultra-glass
$H = 0$	$\tilde{\mu} = \tilde{\mu}_g$	Glass
$0 < H < 1$	$\tilde{\mu} = H\tilde{\mu}_a + (1 - H)\tilde{\mu}_g$	Hybrid
$H = 1$	$\tilde{\mu} = \tilde{\mu}_a$	Aluminum
$H > 1$	$\tilde{\mu} = H\tilde{\mu}_a$	Ultra-aluminum

19

## Piano : modèle de cordes non linéaires

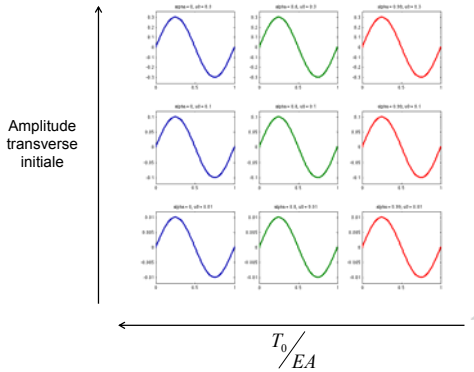


$$\begin{cases} \mu y_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[ EA y_x - (EA - T_0) \frac{y_x}{\sqrt{y_x^2 + (1 + \xi_x)^2}} \right] \\ \mu \xi_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[ EA \xi_x - (EA - T_0) \frac{1 + \xi_x}{\sqrt{y_x^2 + (1 + \xi_x)^2}} \right] \end{cases}$$

20

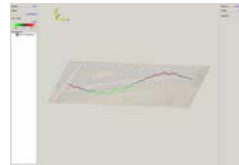
## SIMULATIONS

Cas du piano



21

## Piano : mouvement du chevalet



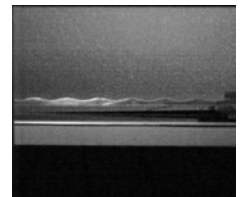
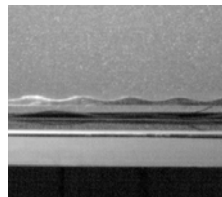
22

## Thème 3 : roulements et transports

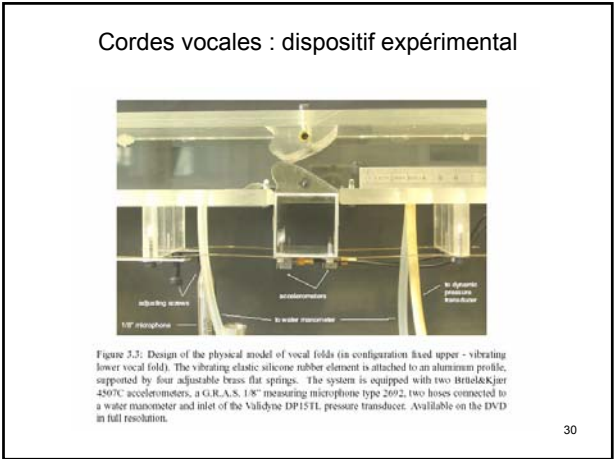
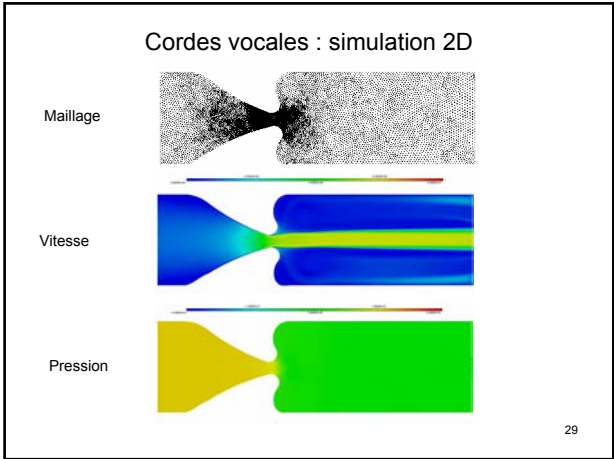
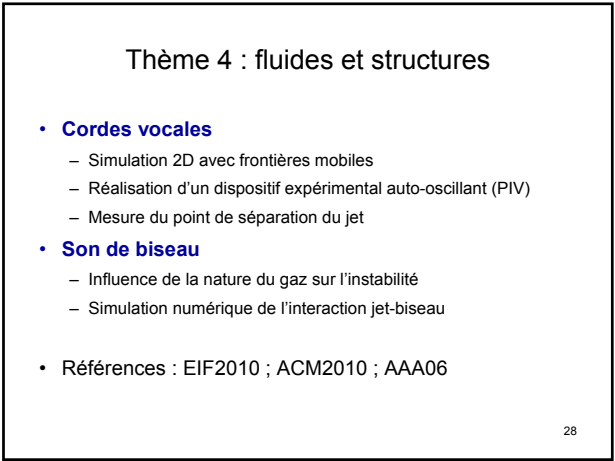
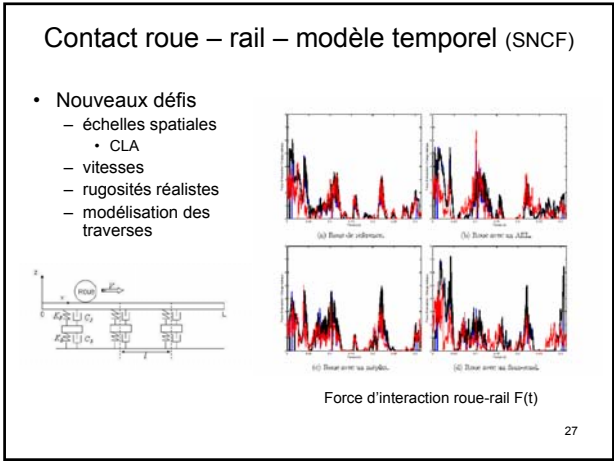
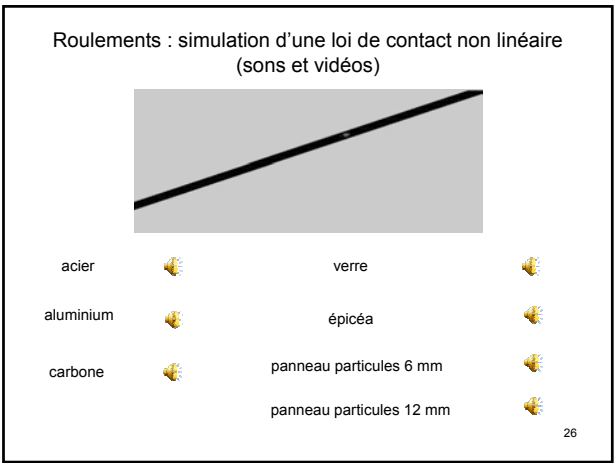
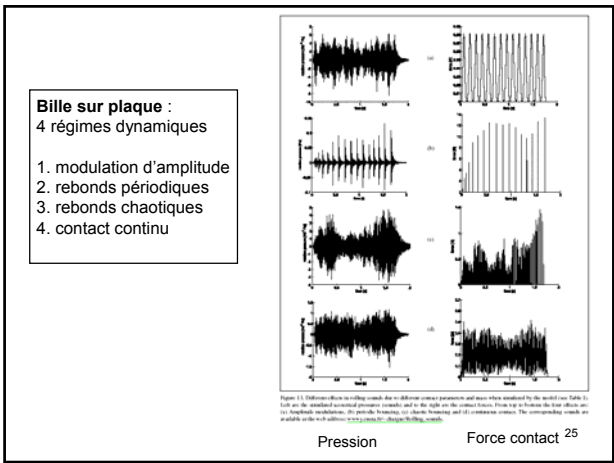
- Cas d'école : bille sur plaque
  - mise en évidence de **4 types de régimes dynamiques** (sons et vidéos):
    - modulation d'amplitude
    - rebonds périodiques
    - rebonds chaotiques
    - contact continu
- Validation et **simulation** d'une loi de contact non linéaire
- Extension au contact **roue-rail**
- Références : AAA07 ; IWRN10

23

## Roulement bille sur plaque : régimes dynamiques



24



## cordes vocales : dispositif (2)

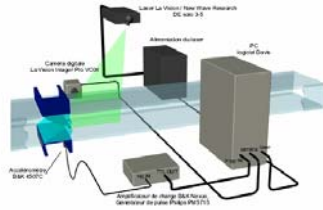


Figure 3.7: 3D diagram of the PIV setup. The signal from the accelerometer, rectified by a TTL pulse generator, is used to trigger the PIV laser and the camera shutter. The laser sheet passes vertically through the middle of the channel so that the domain immediately downstream the glottis is illuminated.

31

## Cordes vocales : mesure du point de séparation du jet

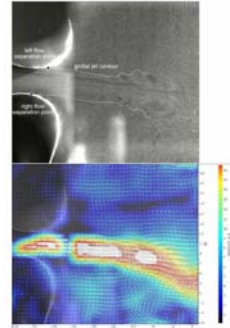
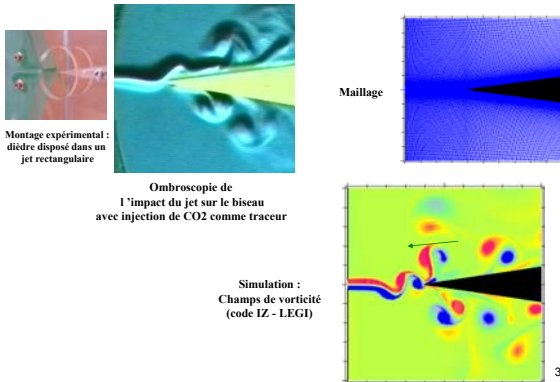


Fig. 7 Raw image recorded by the PIV camera (first frame of the double frame) showing the positions of seeding particles (top). When filtered consecutively with the second frame, the global jet contour and the position where the jet separates from the vocal fold surface are clearly visible. Vector velocity field computed by PIV (bottom).

32

## Son de biseau



Montage expérimental : dièdre disposé dans un jet rectangulaire

Ombroscopie de l'impact du jet sur le biseau avec injection de CO2 comme traceur

Simulation : Champs de vorticité (code IZ - LEGI)

33

## Projet en cours de démarrage : Influence de raidisseurs sur le rayonnement de plaques (et coques)

- Applications
  - instruments à cordes
  - transport (véhicules)
- Premières observations
  - réponse en fréquence : 1-2 kHz
  - influence de la (non)-périodicité des raidisseurs
- Stratégies de modélisation : état de l'art (en cours)
- Difficultés identifiées
- Approche envisagée



34

## Perspectives et projets futurs

- Modèles de **matériaux absorbants** complexes
- Génération de bruits internes et externes en **transport maritime**
- Bruits des **véhicules électriques**

35

## Modèles de matériaux absorbants complexes

- Exemples : **polymères, matériaux poreux et composites**
- **Large utilisation**
  - transport : confort acoustique
  - bâtiment : isolation
  - instruments de musique et conception de sources sonores
- **Position du problème**
  - Grande **dispersion** des courbes d'**absorption fréquentielles**
  - Modèles souvent **approchés** (phénomènes compliqués)
  - Peu (ou pas) de **modèles temporels** disponibles
- **Etudes envisagées**
  - Développement de modèles temporels d'absorption
    - large bande (domaine audible)
    - possédant de bonnes propriétés mathématiques (stabilité, robustesse,...)
    - compromis coût-complexité
  - Exploitation en synthèse sonore
    - sur des structures simples (barres, plaques,...)
    - applications en psychoacoustique (psychomécanique ?) : projet GDR « Visible » UME-LAMSID-ENTPE

36

## Bruit interne et externe en transport maritime

- **Contexte**
  - Démarrage à l'UME d'études sur l'**interaction houle-navire**
  - Opportunité d'étendre les modèles vibro-acoustiques existants aux **fluides lourds**
  - Possibilité de couplage modèles **sources/propagation** acoustique
- **Approches possibles (à discuter)**
  - Ecriture d'un modèle vibroacoustique complet
  - Identification des non-linéarités et sélection
    - équations surface libre
    - non-linéarités mécaniques
    - variation temporelle du chargement (couplage)
    - viscosité ?
  - Choix d'un modèle approché et résolution

37

## Bruit des véhicules électriques

(projet interdisciplinaire labex LaSIPS)

- Contexte : nouveau **dimensionnement mécanique** et conséquences multiples en vibroacoustique
  - Intégration du bloc moteur
  - Modifications des fréquences émises
  - Emergence de bruits nouveaux (?) d'origine électrique
  - Dimensionnement des parois
- Terrain encore quasiment vierge pour les études mixtes **modèles/perception**
  - Qualité sonore dans l'habitacle
  - Perception humaine au sens large
  - Insertions de bruits artificiels ?
- Problèmes de **sécurité** prévisibles à résoudre
  - champ acoustique externe
  - Emissions sonores artificielles ?

38