

Absorbeur électroacoustique: du haut-parleur shunté à la synthèse d'impédance acoustique

Dr. Hervé Lissek, Dr. Sami Karkar, Dr. Romain Boulandet, Etienne Rivet,
Dr. Dimitri Torregrossa, Thach Pham Vu, Malo Grisard (EPFL)

Véronique Adam, Torje Thorsen, Olivier Schmitt (Goldmund)

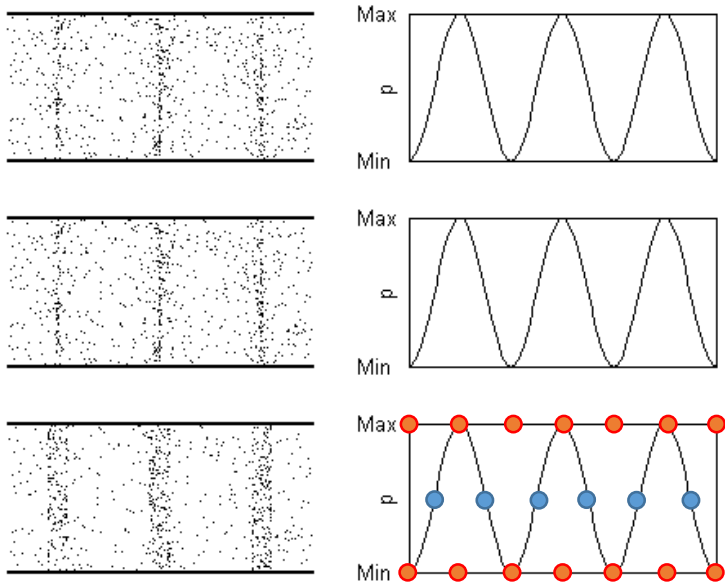
Alain Roux, Christian Martin, Roger Roschnik (PSI Audio)

Antoine Pittet, David Strobino (HEPIA)

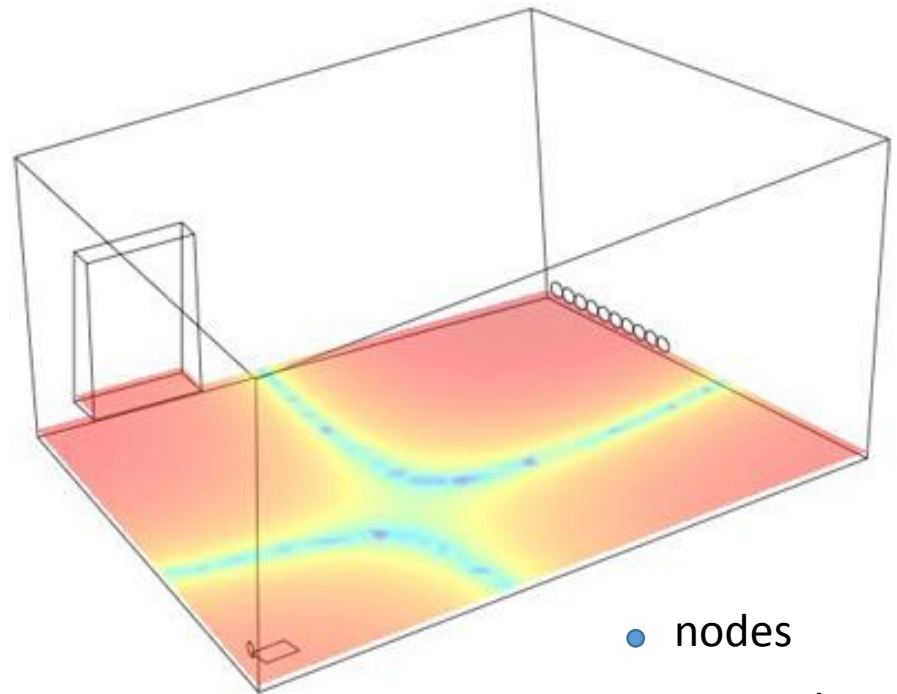
Dr. Manuel Collet (CNRS), Pr. Morvan Ouisse, Gaël Matten (FEMTO-ST)

Motivation: absorbeurs basses fréquences

Superposition of Plane Waves to Create Standing Wave

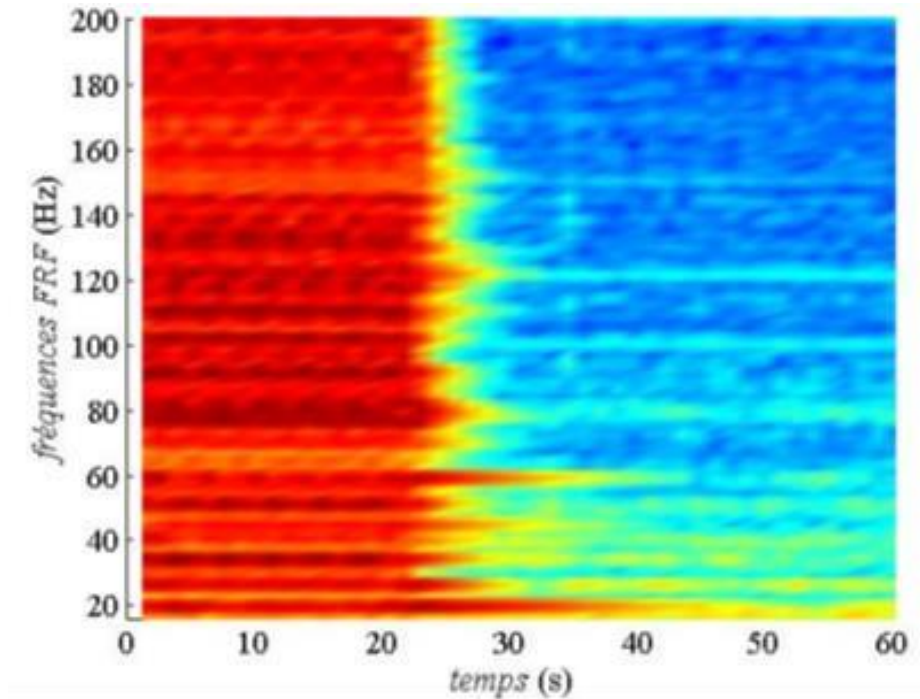


@ Ralph Muehleisen, 2006

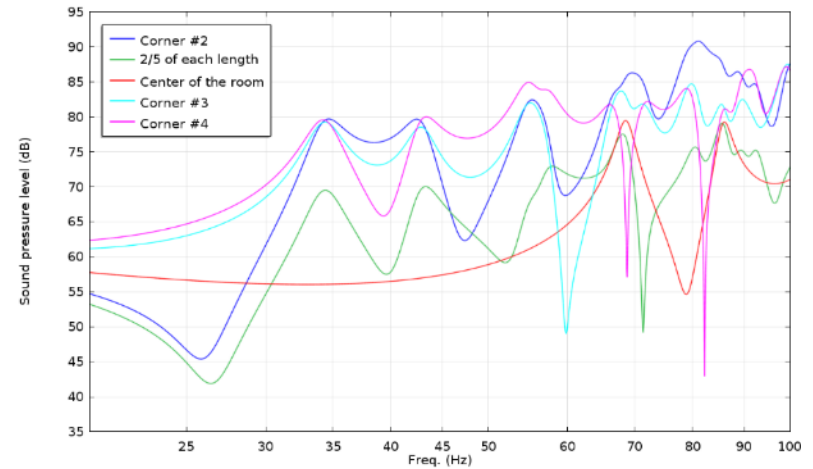


- nodes
- antinodes

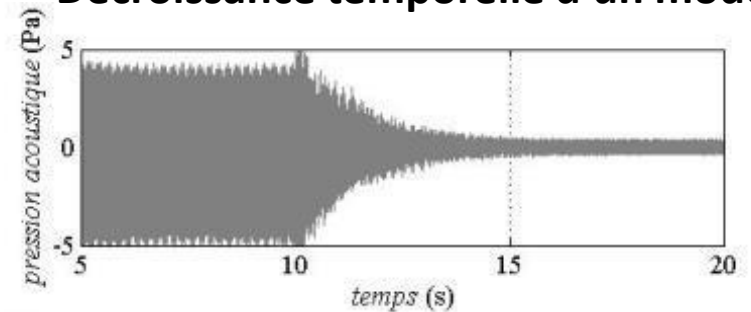
Motivation: absorbeurs basses fréquences



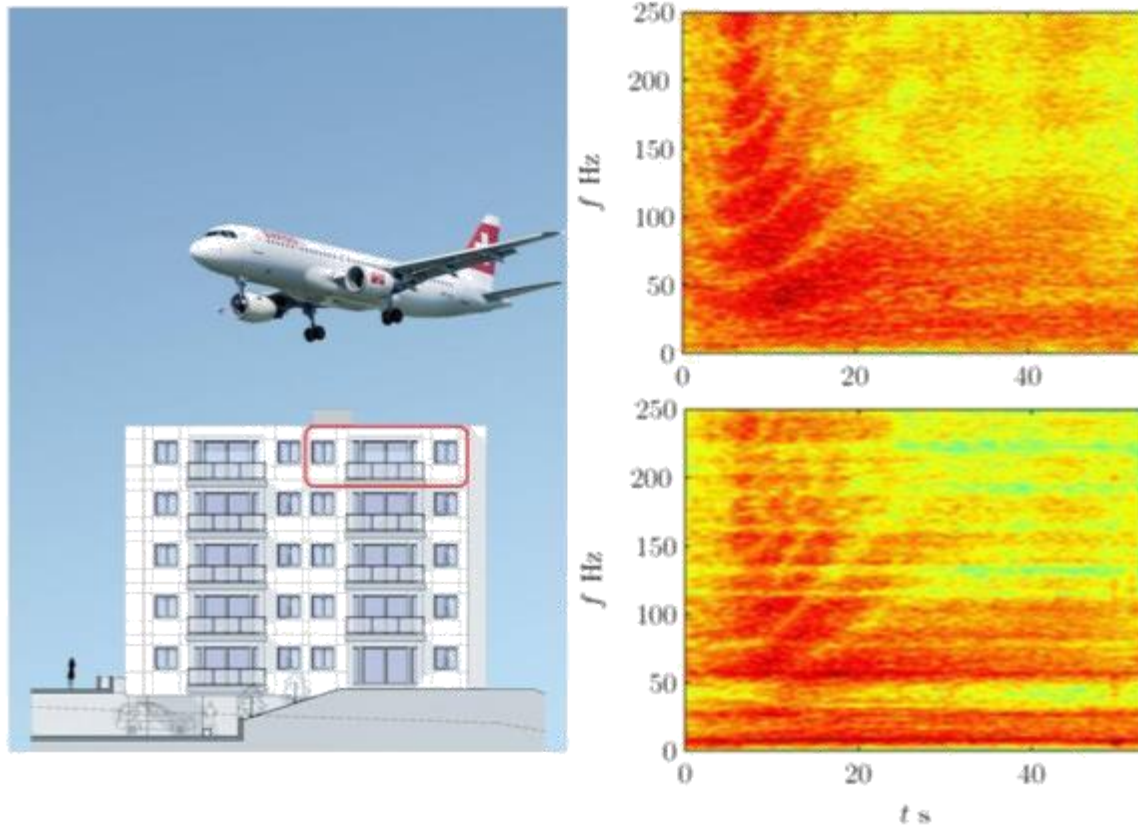
Réponse en fréquence dans la salle



Décroissance temporelle d'un mode

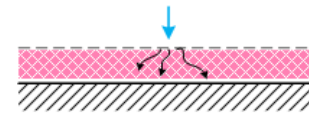
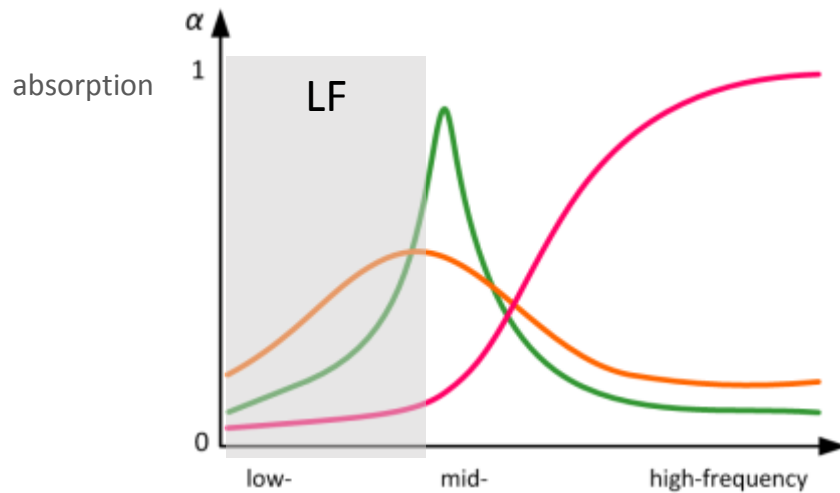


Motivation: absorbeurs basses fréquences

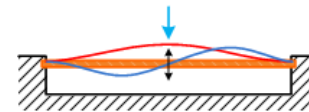


Absorbeurs – état de l’art

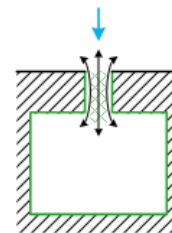
➔ inefficacité aux basses fréquences (règle $\lambda/4$)



Porous materials



Panel absorbers



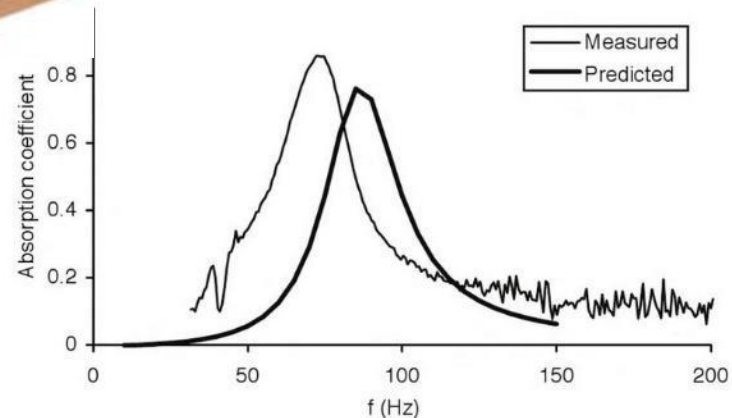
Helmholtz resonators



Absorbeurs – état de l’art

➔ bass-traps (absorbeurs à membrane)

Efficacité basses-fréquences (limitée autour de la fréquence de résonance)



Source: T. Cox and P. D'Antonio, Acoustic absorbers and diffusers, Taylor & Francis Publ., 2009

Plan de la présentation

- Introduction
- Absorbeurs électroacoustiques
- Application à l'amortissement des modes propres de salles
- Conclusions et perspectives

2. Absorbeur électroacoustique

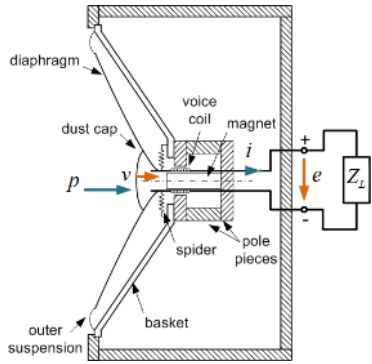
Absorbeur électroacoustique

- Développement d'un absorbeur à membrane présentant un $\alpha > 0.83$ sur la décade [20 - 200Hz]
- Utilisation de résonateurs à membrane asservis
- Partant du constat que la charge électrique d'un HP définit une impédance acoustique qui se combine à celle de la membrane



H. Lissek, R. Boulandet, and R. Fleury, "Electroacoustic absorbers: bridging the gap between shunt loudspeakers and active sound absorption", J. Acoust. Soc. Am., 129(5), 2968-2978, (2011).

Absorbeur électroacoustique



$$\begin{cases} S_d p = Z_m(\omega) v + Bli \\ e = -Blv = -(Z_e + Z_L) i \end{cases}$$

with

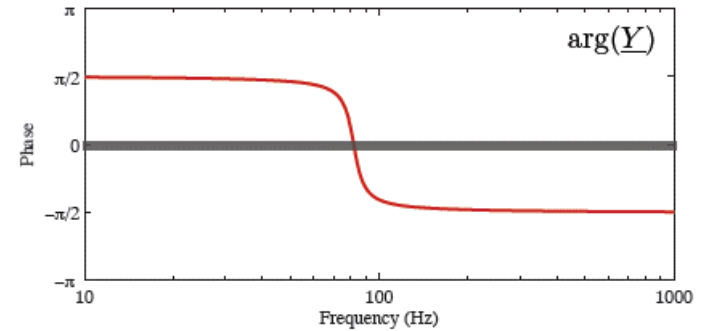
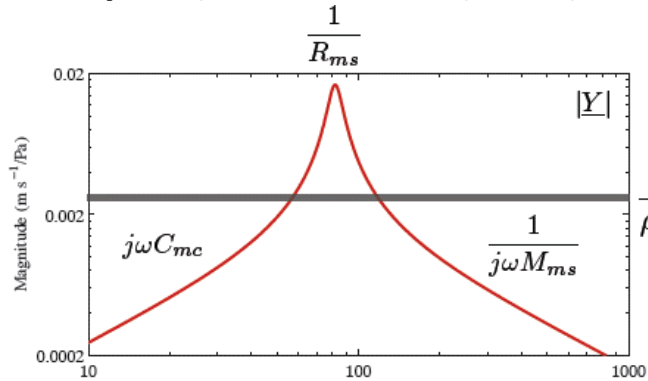
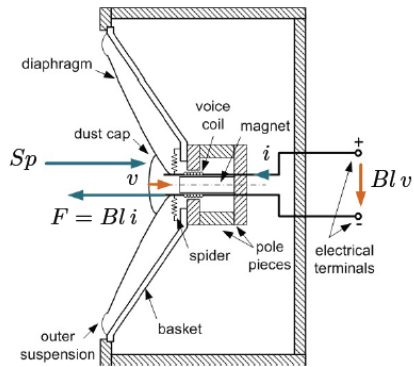
$$\begin{cases} Z_m(\omega) = R_{ms} + j\omega M_{ms} + \underbrace{\frac{1}{j\omega C_{ms}} + \frac{\rho c^2 S_d^2}{j\omega V_b}}_{\frac{1}{j\omega C_{mc}}} \\ Z_e(\omega) = R_e + j\omega L_e \end{cases}$$

L'admittance acoustique normalisée de la membrane s'écrit

$$y(\omega) = \rho c \frac{v}{p} = \rho c S_d \frac{j\omega}{(j\omega)^2 M_{ms} + j\omega R_{ms} + \frac{1}{C_{mc}} + j\omega \frac{(Bl)^2}{j\omega L_e + R_e + Z_L(\omega)}}$$

Absorbeur électroacoustique

1. circuit (électrique) ouvert (i=0)



$$S_d p = Z_m(\omega) v$$

Admittance acoustique normalisée

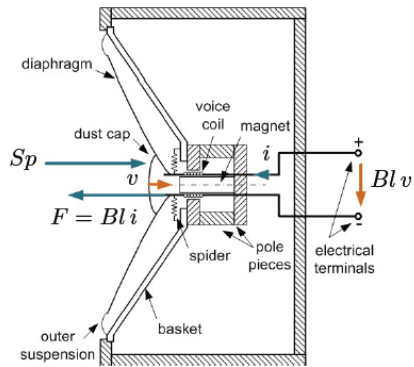
$$y(\omega) = \rho c \frac{v}{p} = \rho c S_d \frac{j\omega}{(j\omega)^2 M_{ms} + j\omega R_{ms} + \frac{1}{C_{mc}}}$$

Parameter	Description	Value	Unit
M_{ms}	Moving mass	13.0	g
R_{ms}	Mechanical resistance	0.8	N.s.m ⁻¹
C_{ms}	Mechanical compliance	120	μm.N ⁻¹
R_e	Electrical resistance	5.6	Ω
L_e	Electrical inductance	0.9	mH
S_d	Membrane surface	133	cm ²
Bl	Force factor	6.9	N.A ⁻¹
V_b	Cabinet volume	10	dm ³
ρ	Air mass density	1.2	kg/m ³
c	Sound celerity in air	343	m.s ⁻¹



Absorbeur électroacoustique

1. circuit (électrique) ouvert (i=0)

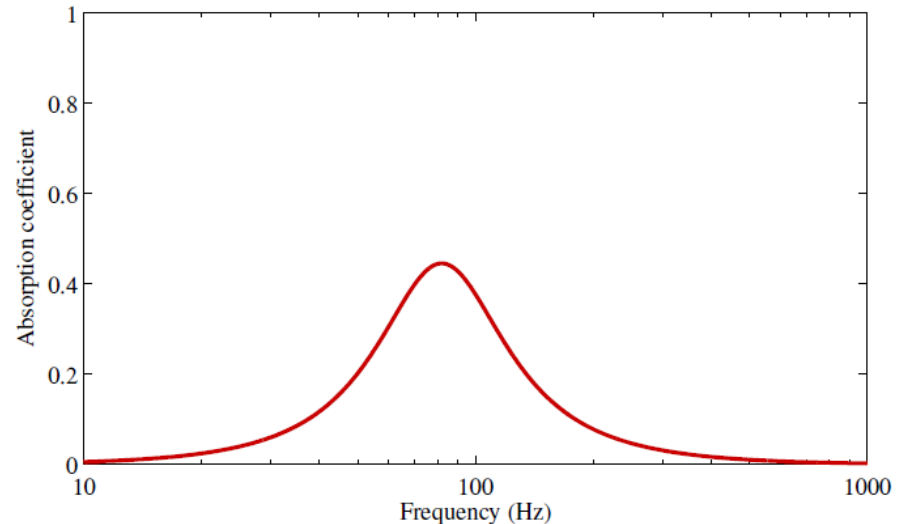


$$S_d p = Z_m(\omega) v$$

Coefficient d'absorption

$$\alpha(\omega) = 1 - \left| \frac{1 - Y(\omega)}{1 + Y(\omega)} \right|^2$$

Perfect absorption
↑
↓
Total reflection

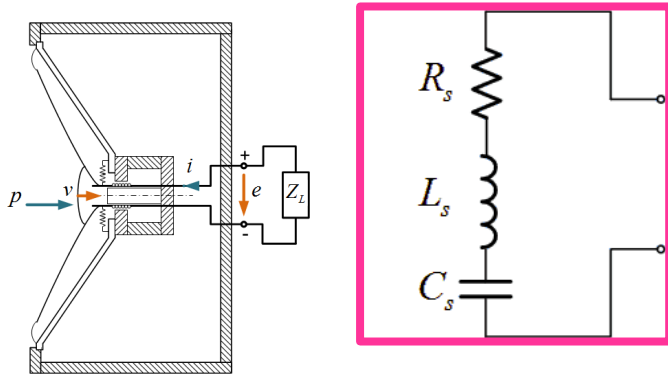


Parameter	Description	Value	Unit
M_{ms}	Moving mass	13.0	g
R_{ms}	Mechanical resistance	0.8	N.s.m ⁻¹
C_{ms}	Mechanical compliance	120	μm.N ⁻¹
R_e	Electrical resistance	5.6	Ω
L_e	Electrical inductance	0.9	mH
S_d	Membrane surface	133	cm ²
Bl	Force factor	6.9	N.A ⁻¹
V_b	Cabinet volume	10	dm ³
ρ	Air mass density	1.2	kg/m ³
c	Sound celerity in air	343	m.s ⁻¹



Absorbeur électroacoustique

2. shunt RLC



$$Z_L(\omega) = R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s}$$

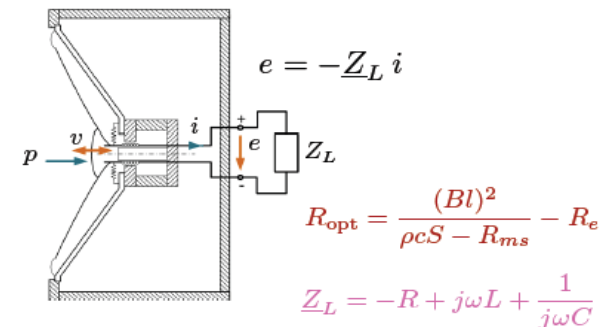
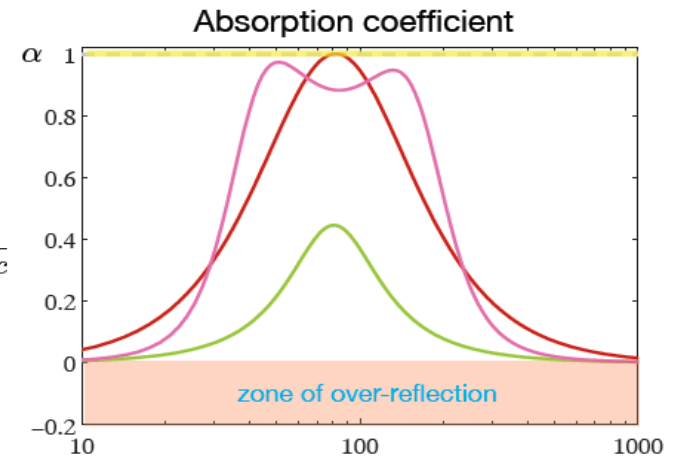
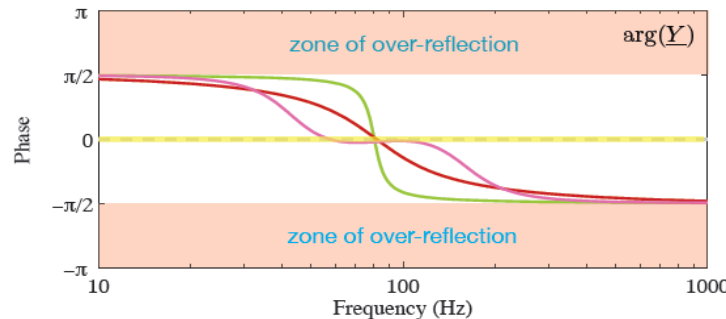
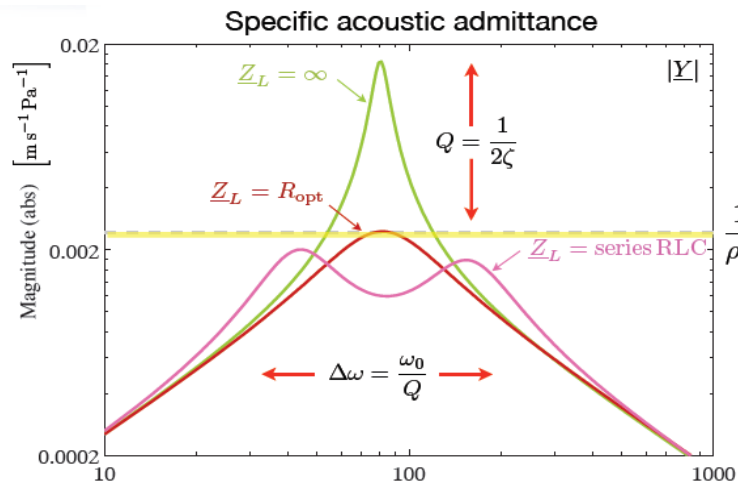
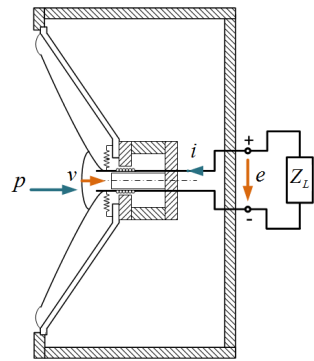
Admittance acoustique normalisée

$$y(\omega) = \rho c \frac{v}{p} = \rho c S_d \frac{(j\omega)^3 a_3 + (j\omega)^2 a_2 + j\omega a_1}{(j\omega)^4 b_4 + (j\omega)^3 b_3 + (j\omega)^2 b_2 + j\omega b_1 + b_0}$$

$$\begin{aligned} a_3 &= L_e + L_s \\ a_2 &= R_e + R_s \\ a_1 &= \frac{1}{C_s} \\ b_4 &= M_{ms} a_3 \\ b_3 &= M_{ms} a_2 + R_{ms} a_3 \\ b_2 &= M_{ms} a_1 + R_{ms} a_2 + \frac{a_3}{C_{mc}} + (Bl)^2 \\ b_1 &= R_{ms} a_1 + \frac{a_2}{C_{mc}} \\ b_0 &= \frac{a_1}{C_{mc}} \end{aligned}$$

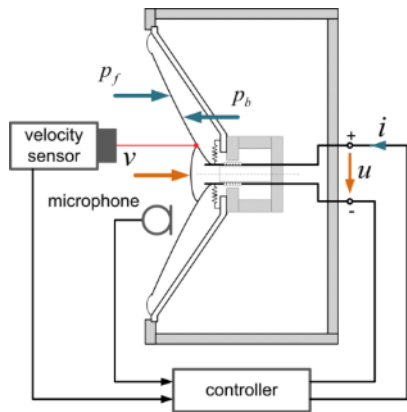
Absorbeur électroacoustique

2. shunt RLC



Absorbeur électroacoustique actif

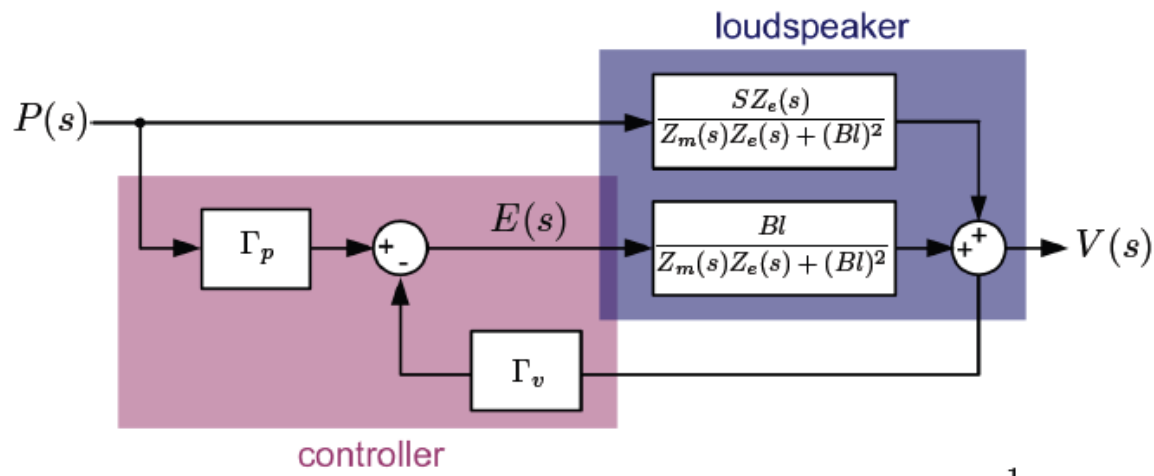
3. «direct impedance control»



$$E(s) = \Gamma_p p(s) - \Gamma_v v(s)$$

condition for acoustic impedance matching

$$\underline{Y} = \frac{v}{p} = \frac{1}{\rho c} \rightarrow \varepsilon = \frac{p}{\rho c} - v \rightarrow \frac{\Gamma_v}{\Gamma_p} = \rho c$$



$$Y(s) = \frac{V(s)}{P(s)} = \frac{SZ_e(s) + Bl\Gamma_p}{Z_m(s)Z_e(s) + (Bl)^2 + Bl\Gamma_v}$$

electroacoustic resonator

$$Y(s) = K \frac{s}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{M_{ms}C_{mc}}}$$

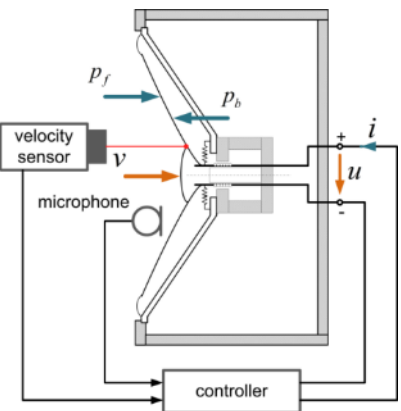
$$K = \frac{SR_e + Bl\Gamma_p}{M_{ms}R_e}$$

$$\zeta = \frac{R_{ms}R_e + (Bl)^2 + Bl\Gamma_v}{2M_{ms}R_e\omega_0}$$

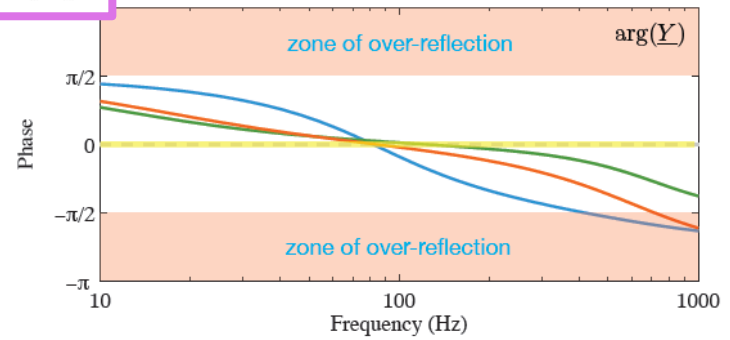
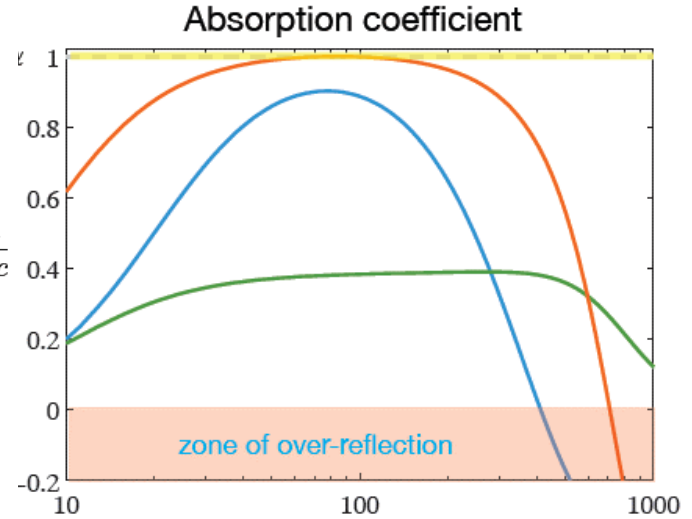
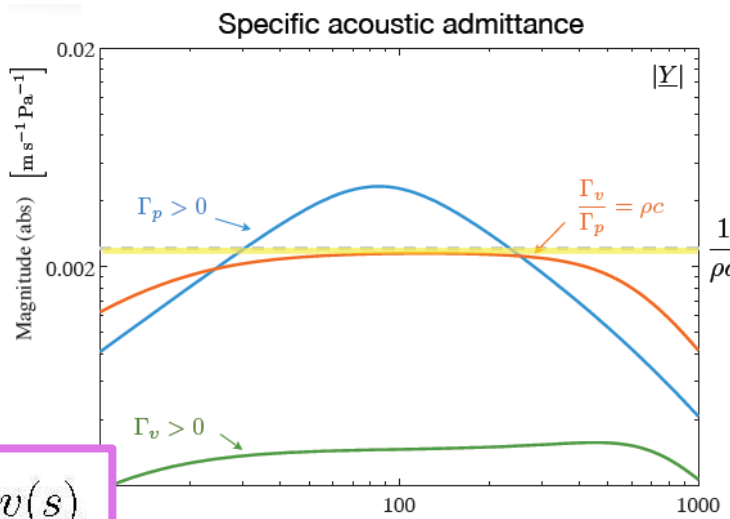


Absorbeur électroacoustique actif

3. «direct impedance control»



$$E(s) = \Gamma_p p(s) - \Gamma_v v(s)$$



Absorbeur électroacoustique actif

4. Approche par synthèse d'impédance électrique

$$SP(s) = Z_m(s)V(s) - Bl I(s)$$

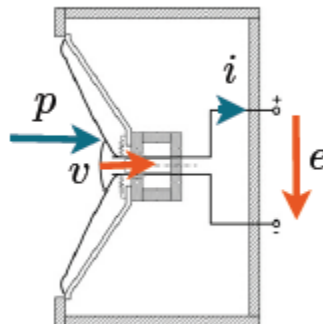
$$E(s) = Z_e(s) I(s) + Bl V(s)$$

Equations caractéristiques

$$E(s) = \Gamma_p P(s) - \Gamma_v V(s)$$

Loi de contrôle

$$\underline{Y} = \frac{\underline{v}}{\underline{p}} = \frac{S\underline{Z}_e + Bl\Gamma_p}{\underline{Z}_m\underline{Z}_e + Bl\Gamma_v + (Bl)^2}$$



$$\underline{Y}_{eq} = \frac{i}{e} = - \frac{\Gamma_p \frac{Z_m}{S} - \Gamma_v - Bl}{Z_e \left(\Gamma_p \frac{Z_m}{S} - \Gamma_v \right) + \frac{(Bl)^2}{S} \Gamma_p}$$

Lissek et al., *Electroacoustic absorbers: bridging the gap between shunt loudspeakers and active sound absorption*, JASA **129** (5), 2011

Absorbeur électroacoustique actif

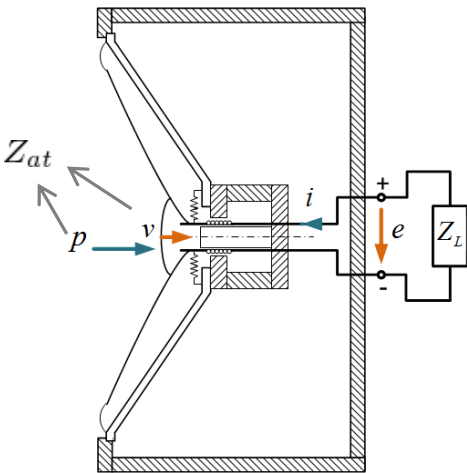
4. Approche par synthèse d'impédance électrique

Relation entre impédances électrique et acoustique

→ **identification de la charge électrique permettant de réaliser une certaine impédance acoustique**

Méthodologie:

1. Définir une impédance acoustique cible Z_{at}
2. Identifier la charge électrique correspondant Y_{eq}



Résistance
acoustique cible

Réactance cible
(assure la stabilité)

$$Z_{at} = \rho c + j\omega X_{a1} + \frac{1}{j\omega X_{a1}}$$

Note: c'est Y_{eq} qui est réalisée plutôt que Z_{eq} (causalité)

$$Y_{eq} = \frac{1}{-Z_e + \frac{Bl^2}{Z_{at}S - Z_m}}$$

Absorbeur électroacoustique actif

4. Approche par synthèse d'impédance électrique

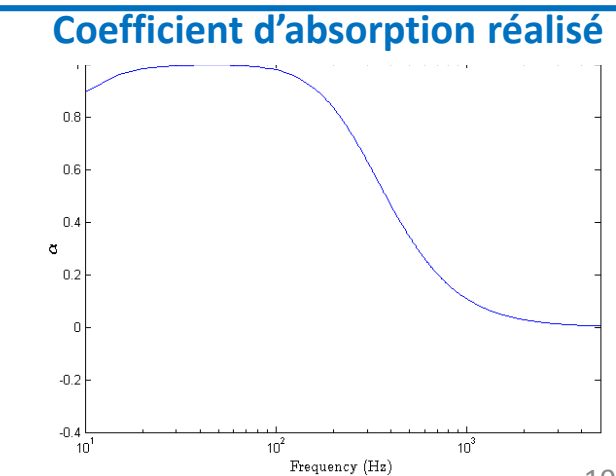
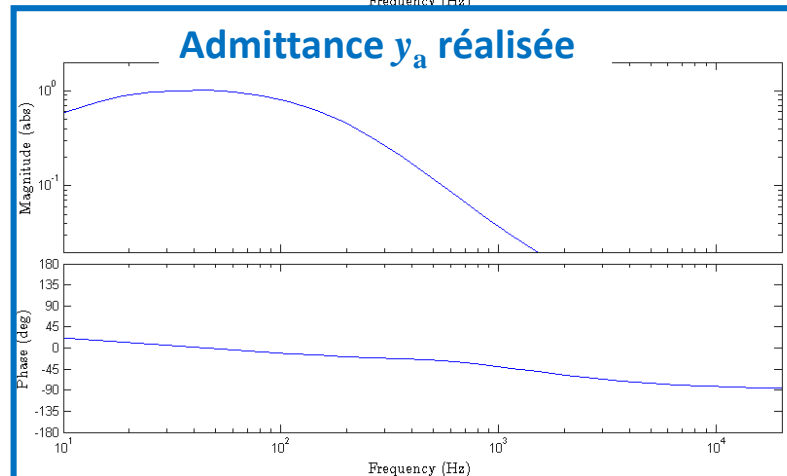
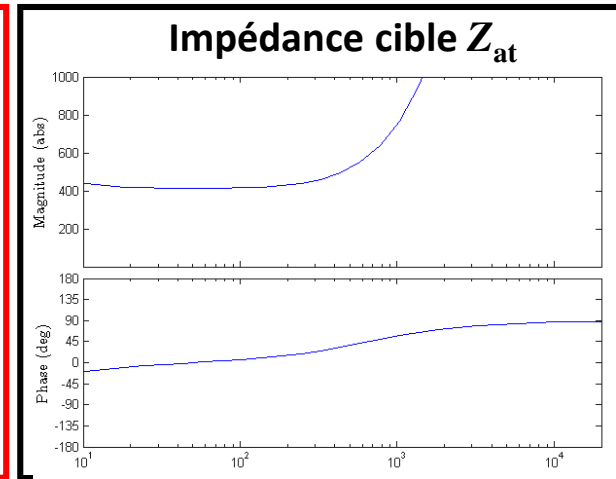
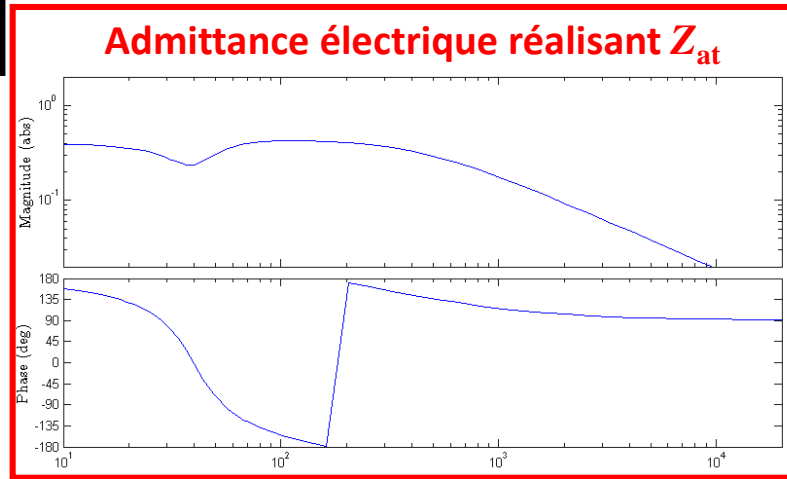
$$Z_{at} = \rho c + j\omega X_{a1} + \frac{1}{j\omega X_{a1}}$$



$$Y_{eq} = \frac{1}{-Z_e + \frac{Bl^2}{Z_{at}S - Z_m}}$$



$$y_a = \frac{S}{Z_m + \frac{Bl^2}{Z_e + Z_{target}}}$$



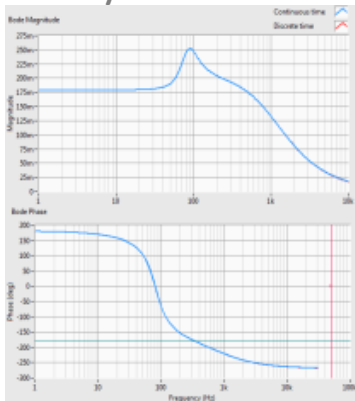
Absorbeur électroacoustique actif

4. Approche par synthèse d'impédance électrique

Réalisation analogique complexe → implémentation numérique:

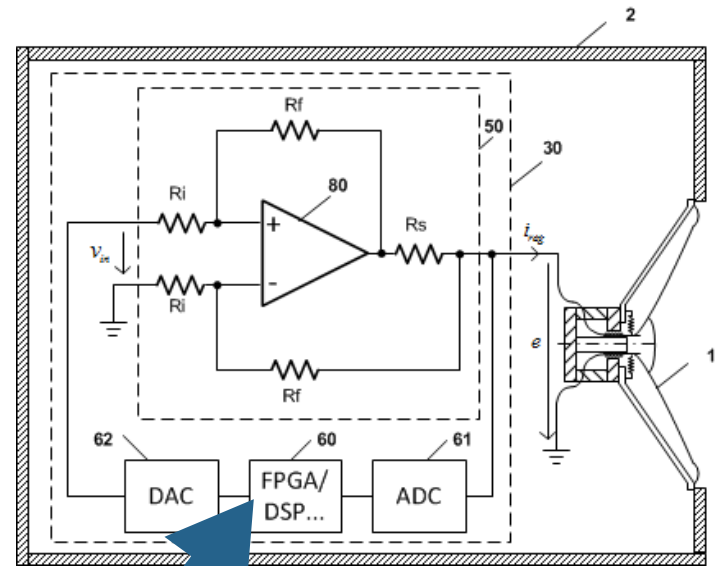
- Design de filtres numériques (p.ex. sur FPGA) réalisant la fonction de transfert ($Y_{eq}(\omega)$) désirée
- Fonction admittance réalisée à l'aide d'un ampli à transconductance ($u \rightarrow i$)

Filtre IIR synthétisé



CompactRIO® real-time controller

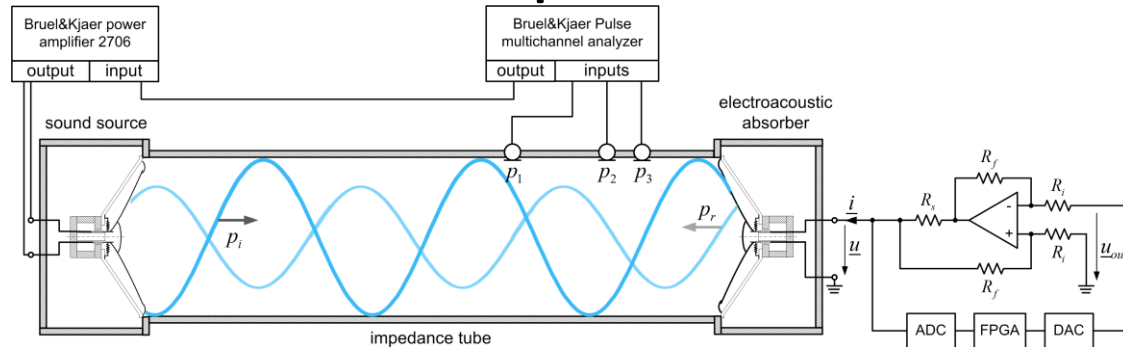
$$i_{reg} = \frac{R_i}{R_f R_s} u_{out}$$



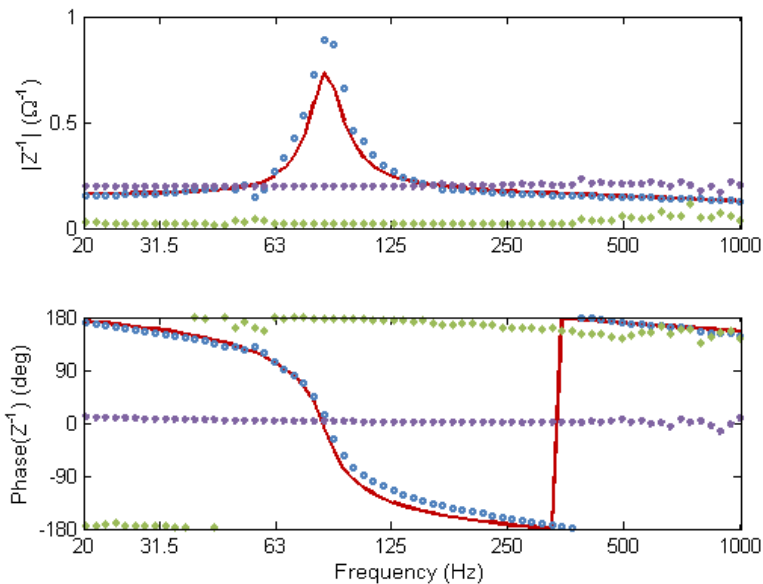
Absorbeur électroacoustique actif

ISO 10534-2 : acoustic impedance measurement technique

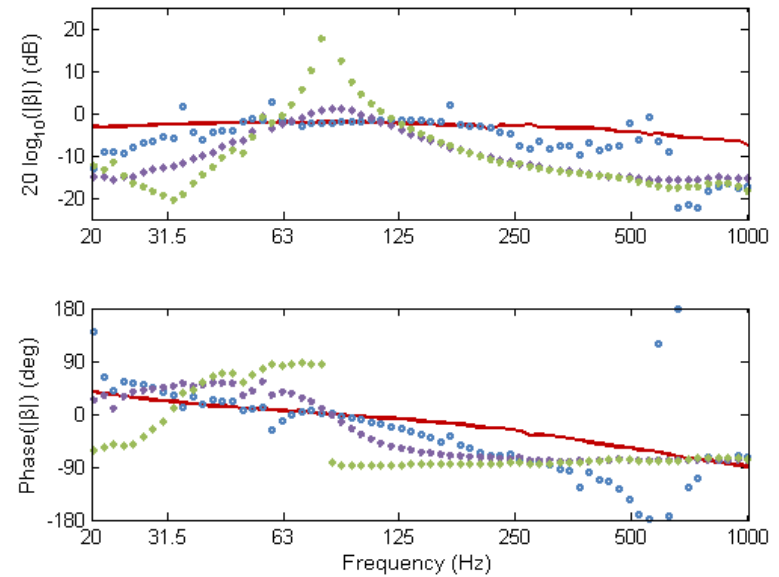
- Measurements (specs)
- Synthesis
- ◆ Passive shunt
- ◆ Synthesis zero-absorption



Admittance électrique réalisée



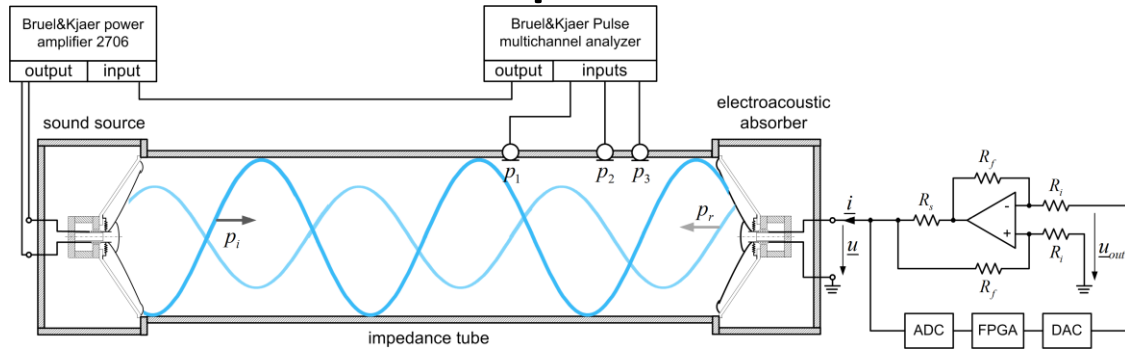
Admittance acoustique obtenue



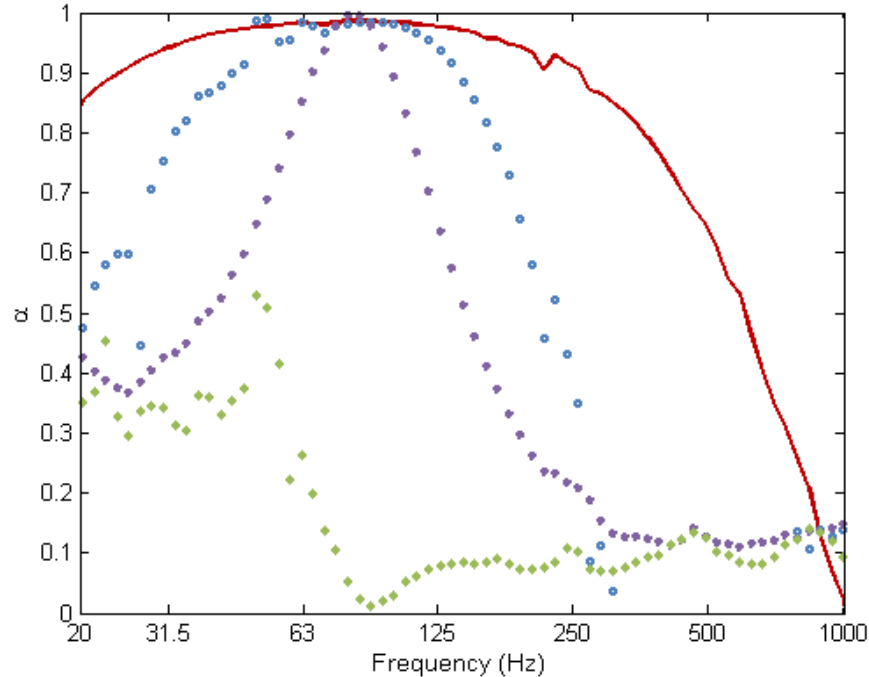
Absorbeur électroacoustique actif

ISO 10534-2 : acoustic impedance measurement technique

- Measurements (specs)
- Synthesis
- ◆ Passive shunt
- ◆ Synthesis zero-absorption



Coefficients d'absorption obtenus



Absorbeur électroacoustique actif

5. Nouvelle approche: «specific feedforward»

L'admittance électrique Y_{eq} se comporte comme une commande en courant, à partir de la fem e .

L'idée est de remplacer cette tension e par la pression acoustique p

Cette nouvelle technique a été identifiée comme améliorant la stabilité en boucle fermée (→ extension de bande passante)

$$Y_{eq} = \frac{1}{-Z_e + \frac{Bl^2}{Z_{at}S - Z_m}}$$

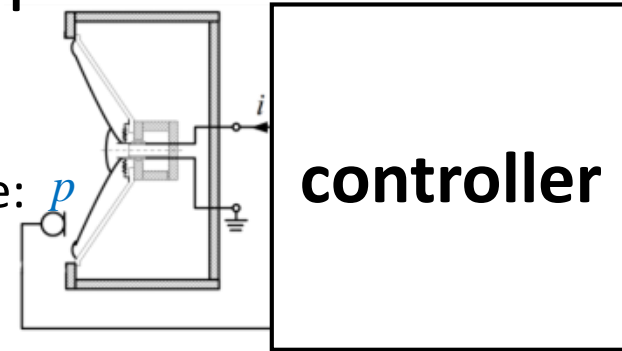
↑
Source potentielle d'instabilité

Absorbeur électroacoustique actif

5. «specific feedforward»

On part toujours de la consigne d'impédance acoustique:

$$\underline{Z}_{at} = j\omega \frac{\mu M_{mc}}{S_d} + R_{at} + \frac{\mu}{j\omega S_d C_{mc}}$$



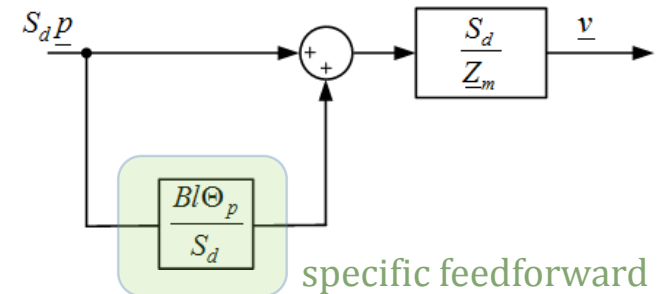
En combinant la technique de synthèse d'admittance électrique et une approche de contrôle via un capteur (microphone) et un contrôleur numérique

$$S_d \underline{p} = \underline{Z}_m \underline{v} + Bl \underline{i} \quad : \text{utile}$$

$$\underline{u} = \cancel{\underline{Z}_m \underline{v}} - Bl \underline{v} \quad : \text{source d'instabilité}$$

Fonction de transfert ($p \rightarrow i$) Θ_p :

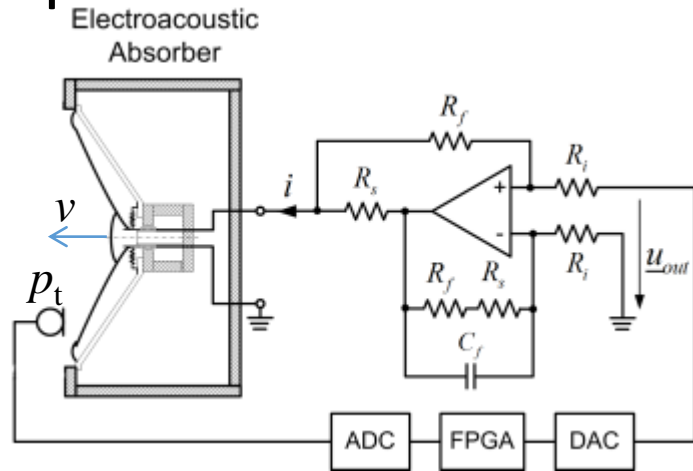
$$\begin{cases} S_d \underline{p} = \underline{Z}_m(\omega) \underline{v} + Bl \underline{i} \\ \text{avec } \underline{i} = \Theta_p \underline{p} \end{cases} \Rightarrow \underline{Z}_a(\omega) = \frac{\underline{p}}{\underline{v}} = \frac{\underline{Z}_m(\omega)}{S_d - Bl \Theta_p} \Rightarrow \Theta_p = \frac{S_d \underline{Z}_{at} - \underline{Z}_m}{Bl \underline{Z}_{at}}$$



Always stable (only dependant on the coupling with the room)

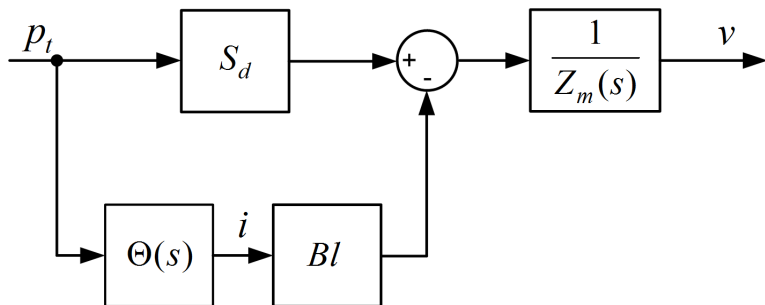
Absorbeur électroacoustique actif

5. «specific feedforward»



$$\begin{cases} S_d p = Z_m(\omega)v + Bl\Theta_p(\omega)p \\ Z_a(\omega) = \frac{p}{v} = \frac{Z_m}{S_d - Bl\Theta_p(\omega)} \end{cases}$$

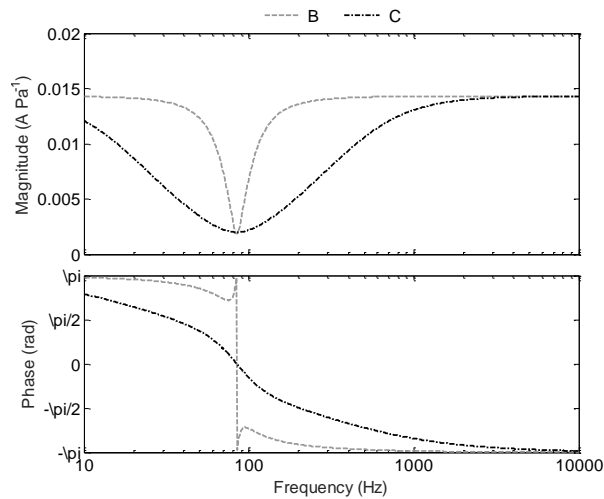
L'impédance acoustique cible Z_{at} peut être imposée en identifiant la fonction de transfert du contrôleur:



$$\Theta_p(\omega) = \frac{S_d Z_{at} - Z_m(\omega)}{Bl \cdot Z_{at}}$$

Absorbeur électroacoustique actif

Implémentation:

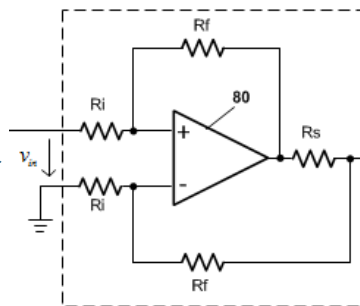


$$Z_{at} = R_{at} + j\omega M_{at} + \frac{1}{j\omega C_{at}}$$

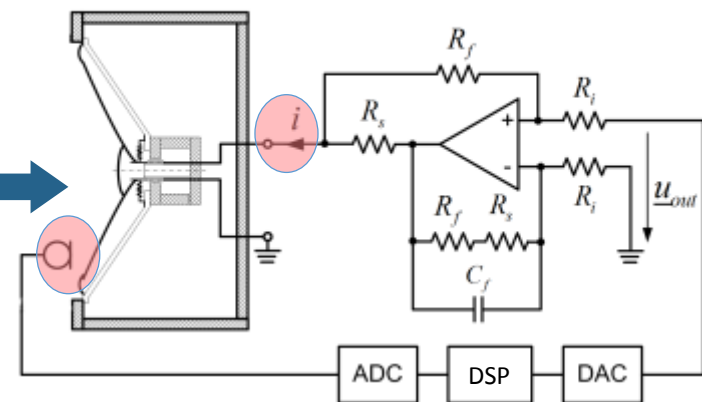
$$\Theta_p(\omega) = \frac{S_d Z_{at} - Z_m(\omega)}{Bl \cdot Z_{at}} = \frac{\sum n_i (j\omega)^i}{\sum d_j (j\omega)^j}$$

Filter implemented on a DSP platform

Voltage-driven current amplifier

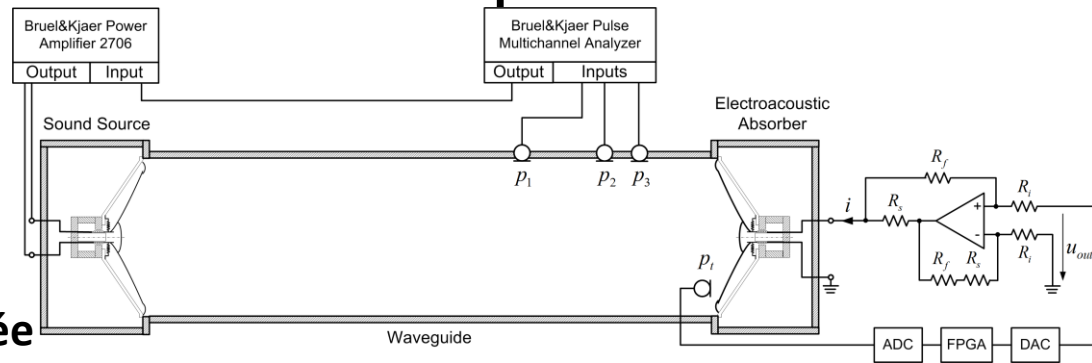


Electroacoustic Absorber

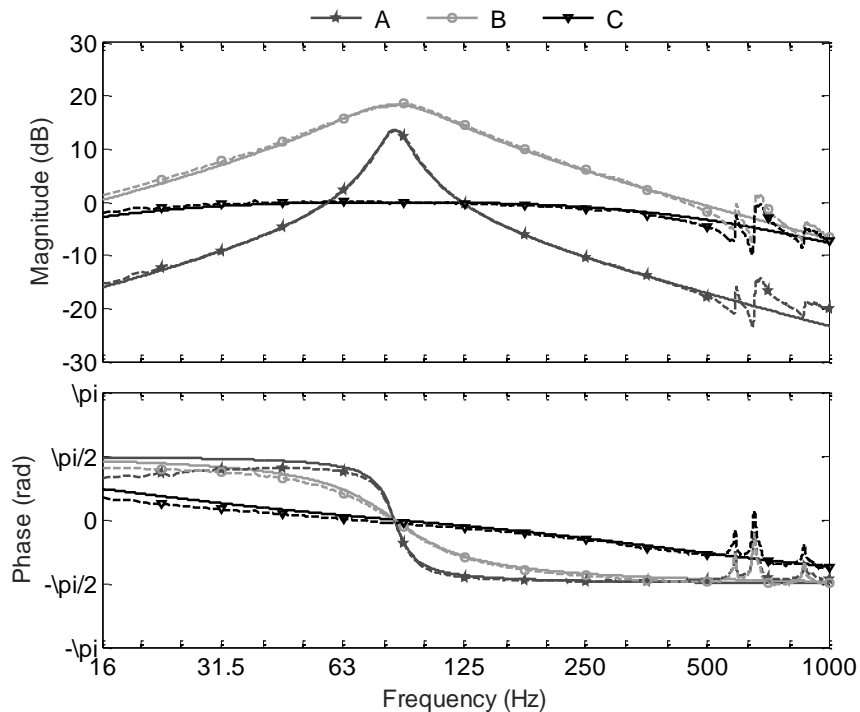


Absorbeur électroacoustique actif

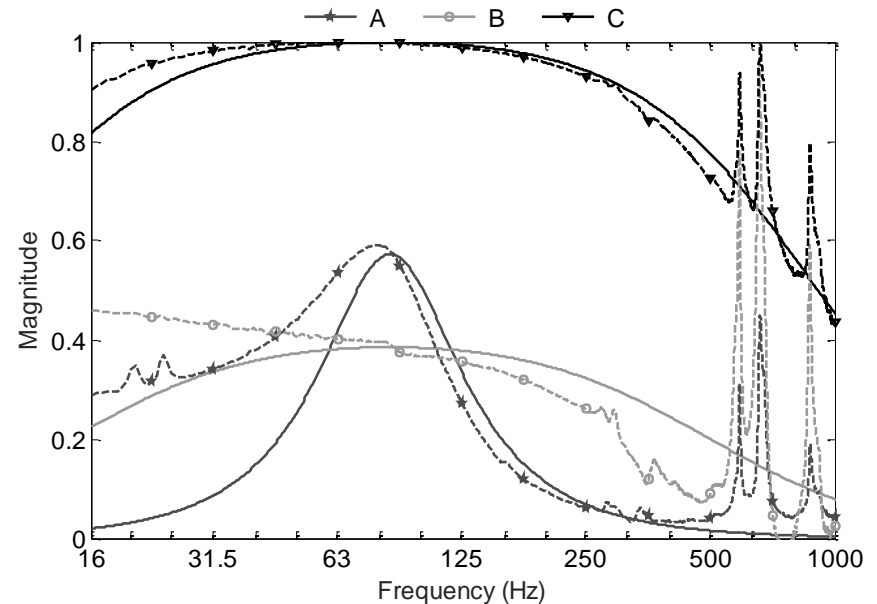
ISO 10534-2 : acoustic impedance measurement technique



Admittance acoustique mesurée

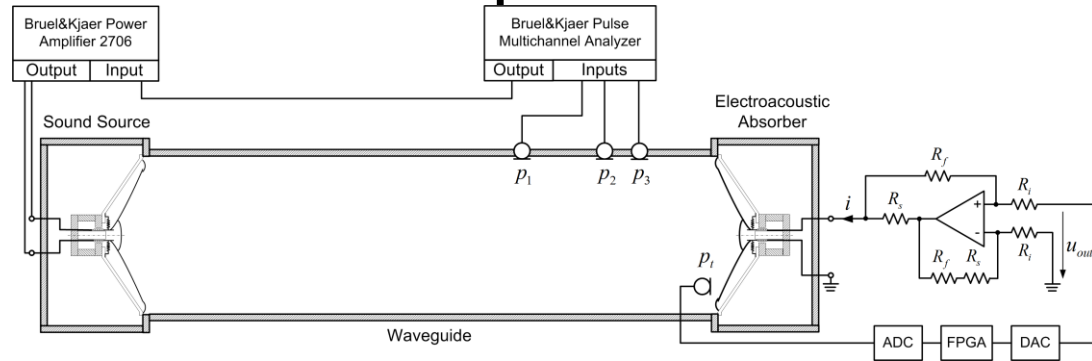


Coefficients d'absorption mesurés

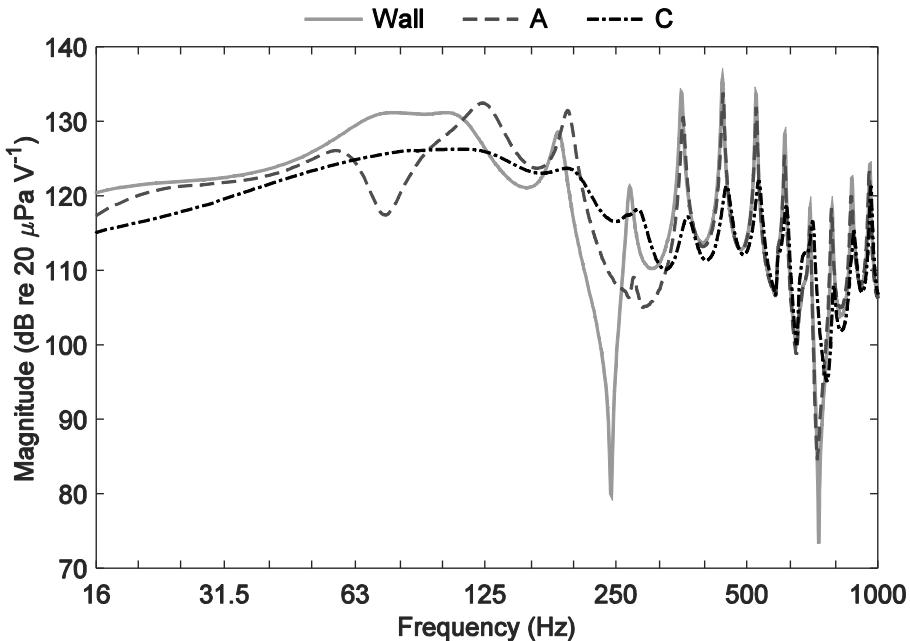


Absorbeur électroacoustique actif

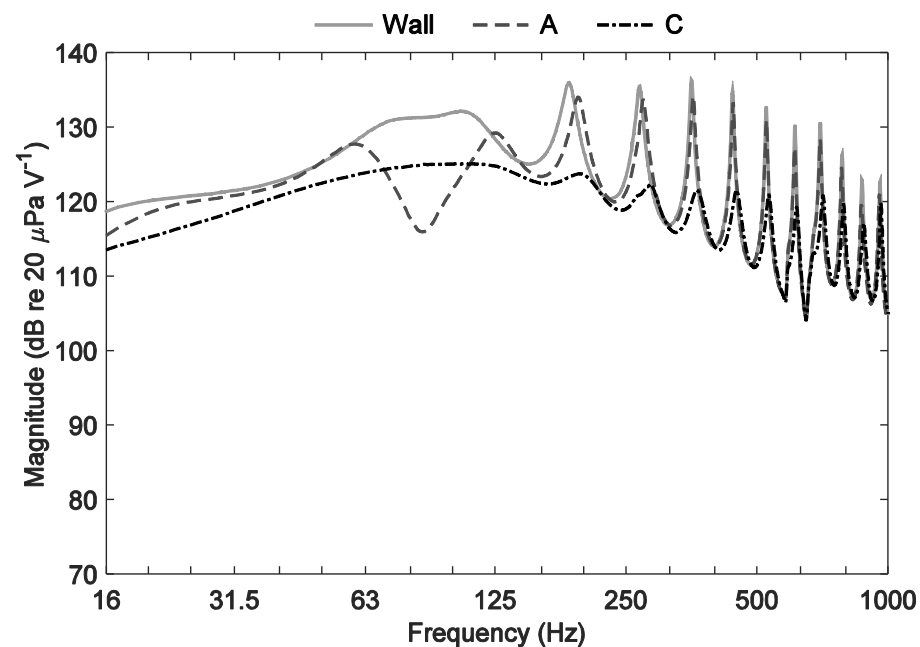
ISO 10534-2 : acoustic impedance measurement technique



Niveau de pression au mic 1



Niveau de pression au mic 2



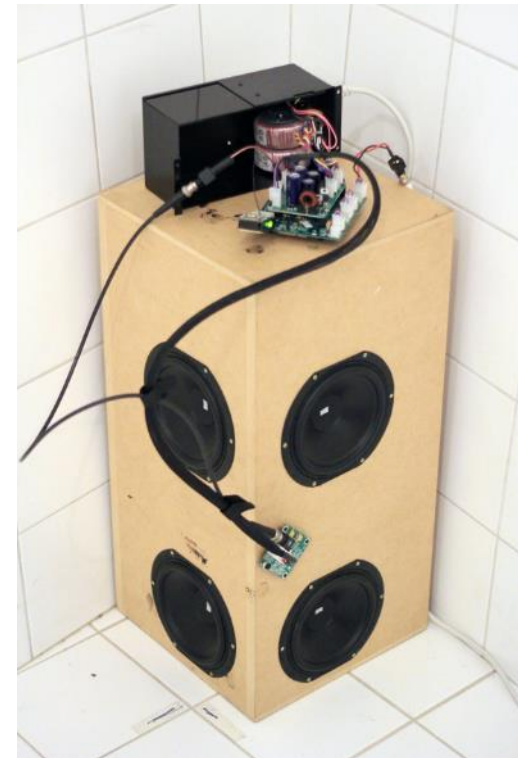
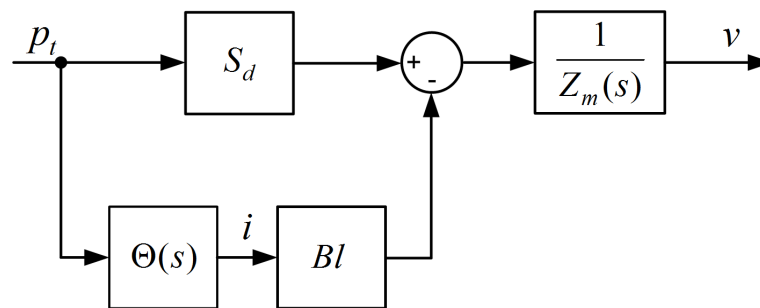
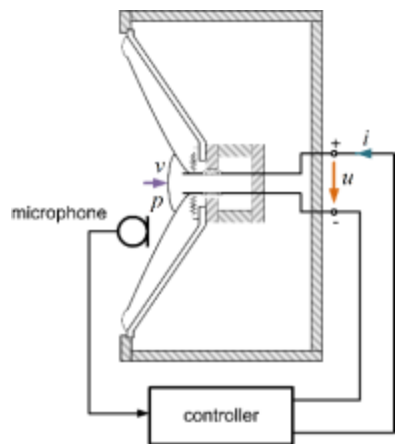
3. Application à l'amortissement des modes de salle

Dispositif expérimental

4x4 absorbeurs électroacoustiques prototypes

(surface = $16 \times 151 \text{ cm}^2 = 0.24 \text{ m}^2$)

En salle réverbérante (surface 226.9 m^2)



Résultats

1. Réponse en fréquence sans et avec absorbeurs

- identification des modes propres
- évaluation de l'amortissement modal

2. Décroissances modales sans et avec absorbeurs

- évaluation de l'amortissement dans le domaine temporel

3. Enregistrement de musique sans et avec absorbeurs

- effets audibles sur la diffusion de musique

4. Enregistrement de kicks de grosse caisse, sans et avec absorbeurs

- effets audibles sur de la musique acoustique

Evaluation expérimentale

Hardware

- **Enregistreurs/analyseurs**
 - B&K Pulse (réponses en fréquence)
 - résolution: 31.5 mHz
 - Carte son M-Audio M-Track 8 (enregistrements)

- **Microphones**

PCB 130D20
(réponses en fréquence)



Beyerdynamic M101 N
(registremnts)



- **Sources** Subwoofer



Grosse caisse
(Pearl Export)



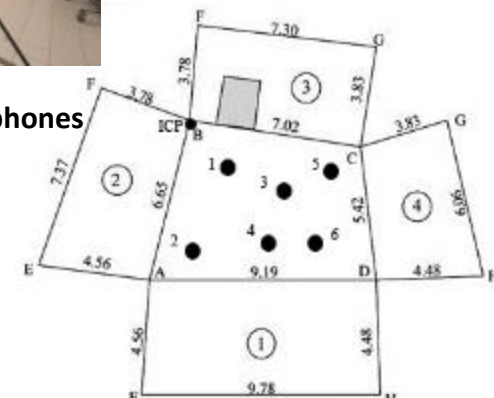
Facility (reverberant chamber, $V=215.6 \text{ m}^3$, $S=226.9 \text{ m}^2$)



4 absorbeurs électroacoustiques
aux 4 coins

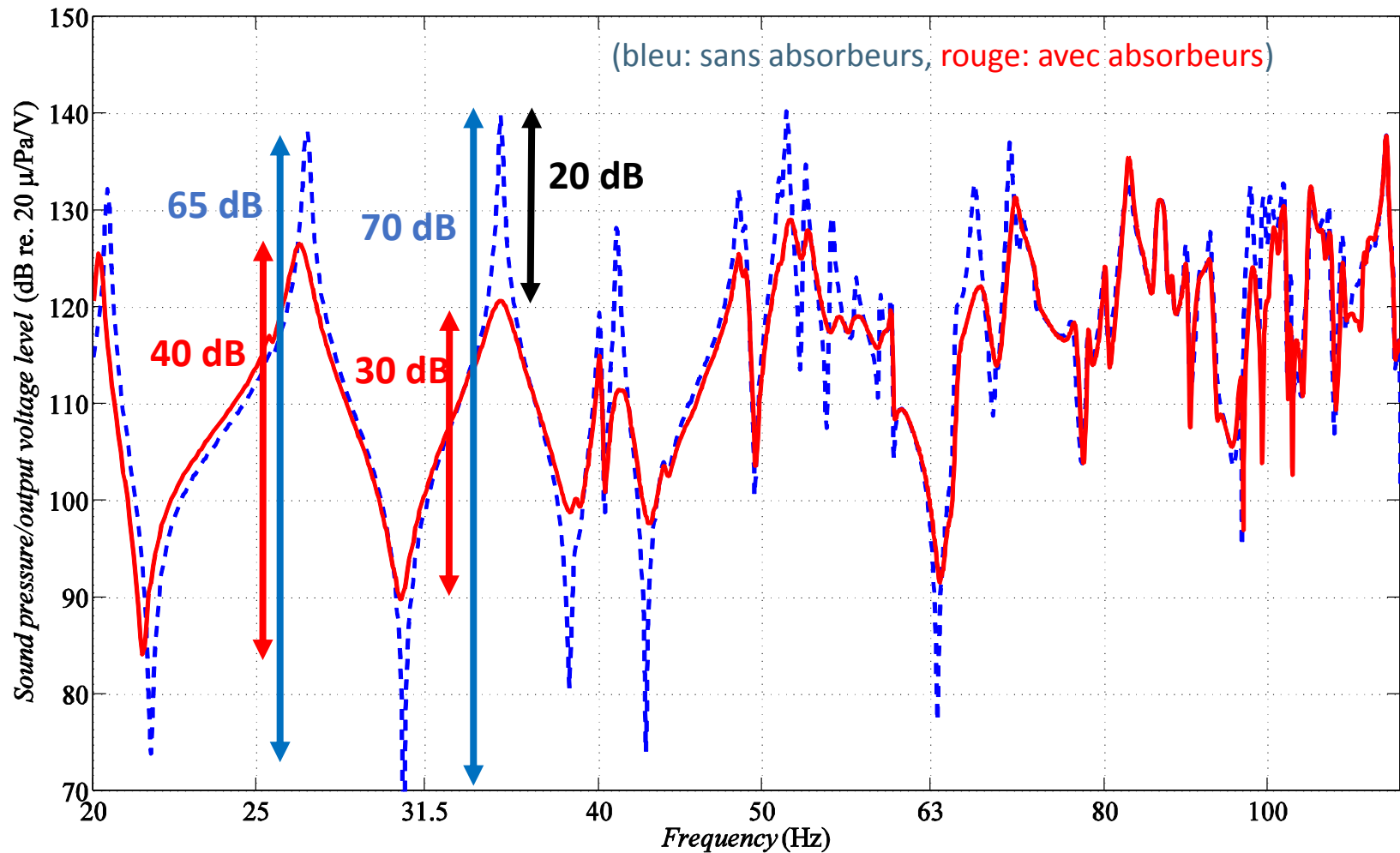
Panneaux absorbants
supplémentaires

7 positions de microphones



Id	height m	Distance to corner A		Distance to corner B		Distance to corner C		Distance to corner D	
		m	m	m	m	m	m	m	m
ICP	0.83	-	0	-	-	-	-	-	-
Micro 1	1.83	4.89	3.35	-	-	-	-	-	-
Micro 2	2.79	2.07	5.55	-	-	-	-	-	-
Micro 3	1.81	6.40	4.90	-	-	-	-	-	-
Micro 4	2.20	-	4.17	3.31	-	-	-	-	-
Micro 5	1.22	-	-	1.62	-	5.00	-	-	-
Micro 6	1.49	-	-	4.00	-	2.84	-	-	-

1. Réponse en fréquence



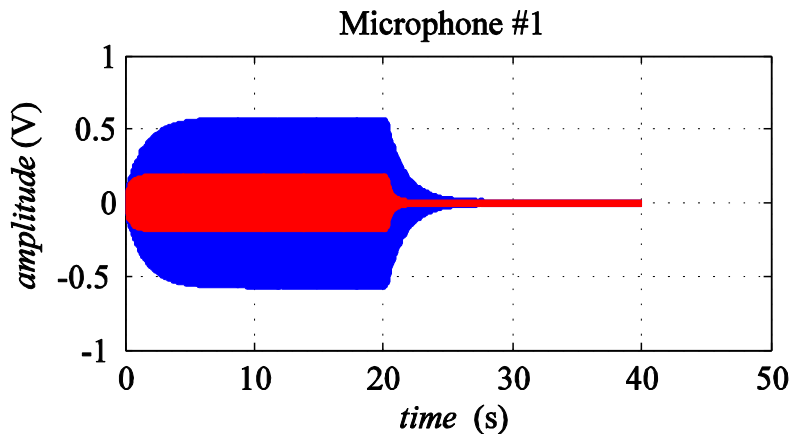
2. Décroissances modales

Mode 8 – Formes d’ondes

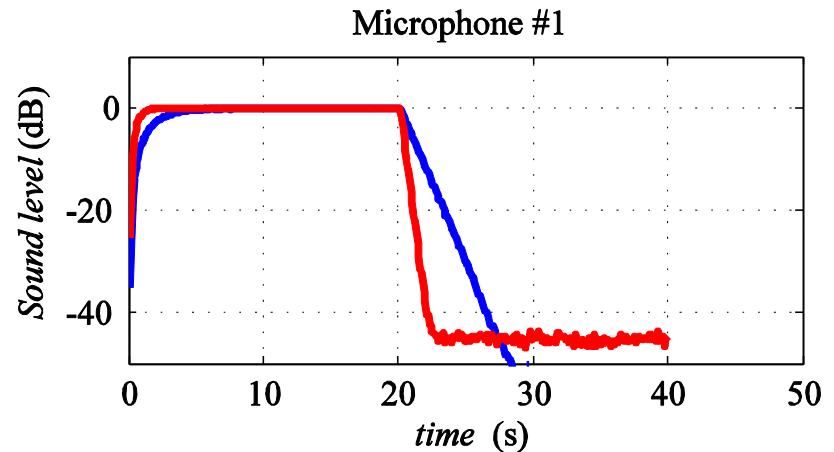
(sans absorbeurs: 52.78 Hz - avec: 52.72 Hz)

Mode 8 - échogrammes

(sans absorbeurs : 52.78 Hz - avec : 52.72 Hz)

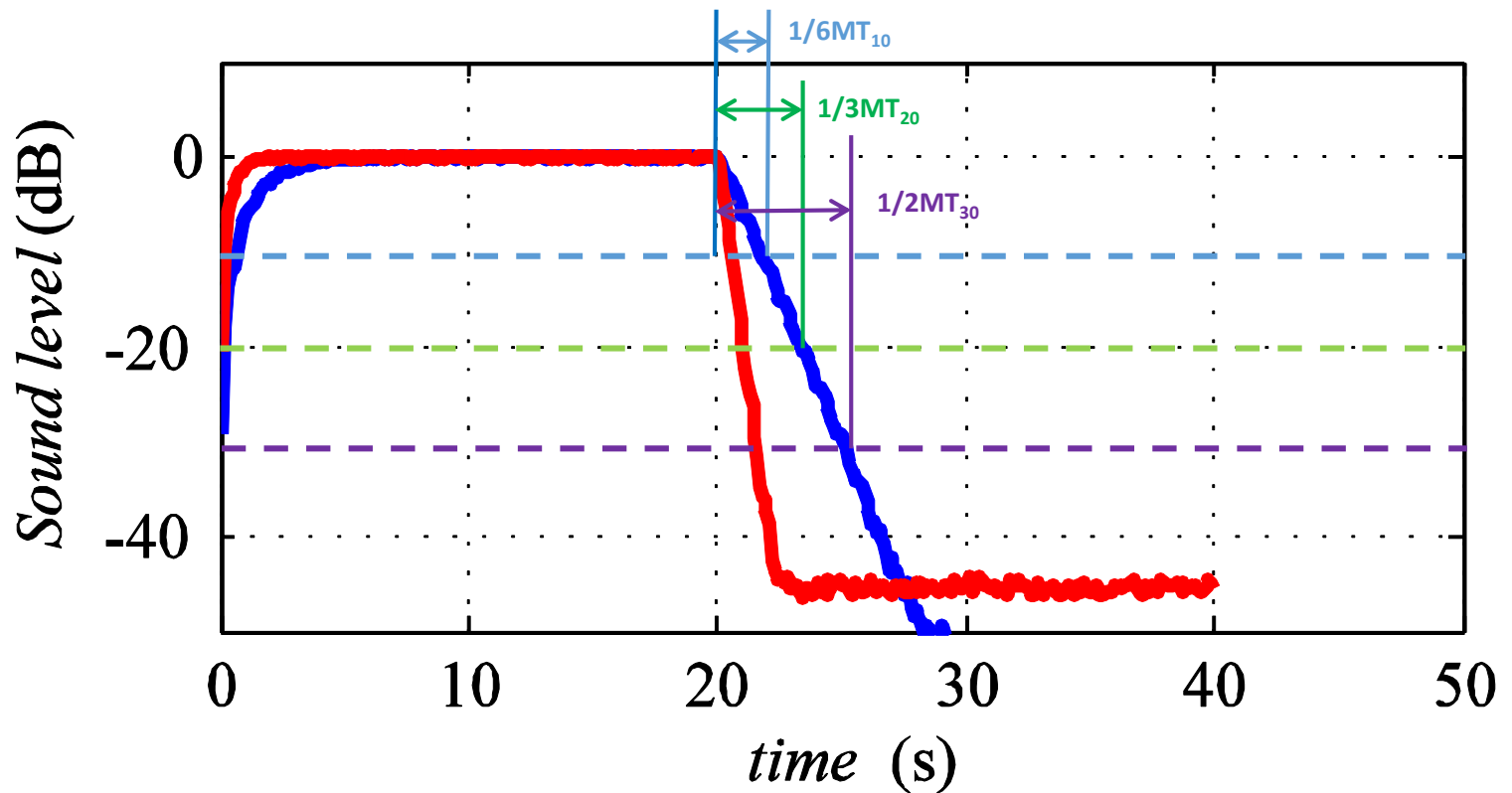


Mode 8 - Hardwalls

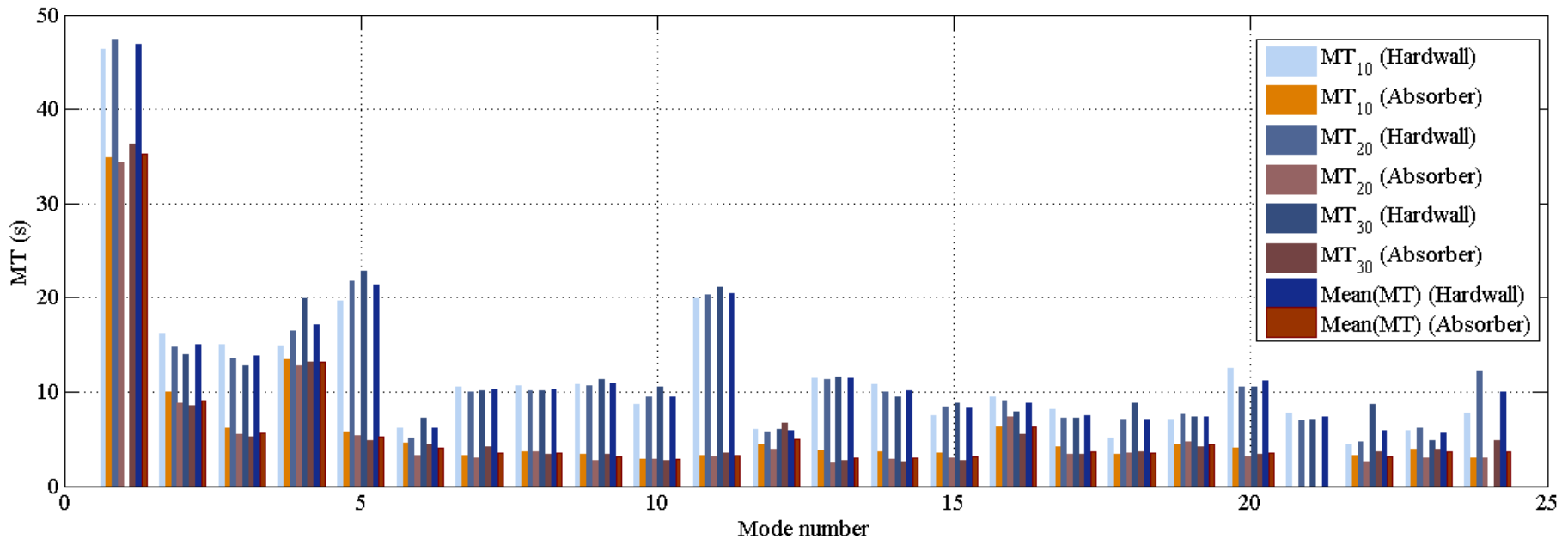


Mode 8 - Absorbers

2. Décroissances modales

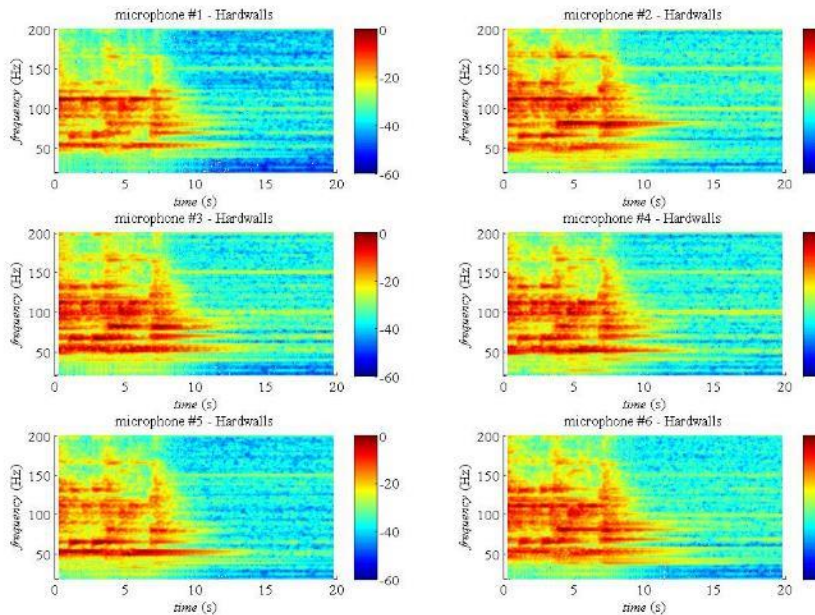


2. Décroissances modales

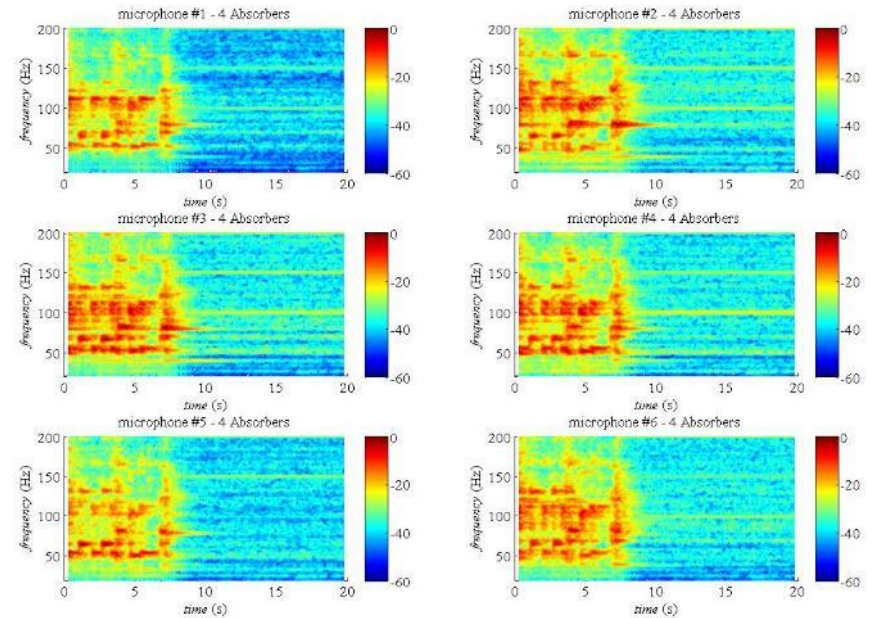


3. Diffusion de musique

Extrait musical Sans absorbeurs

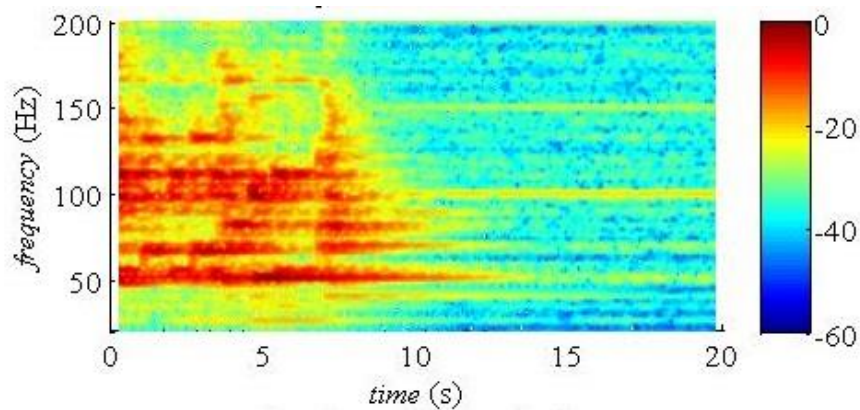


Extrait musical Avec absorbeurs



3. Diffusion de musique

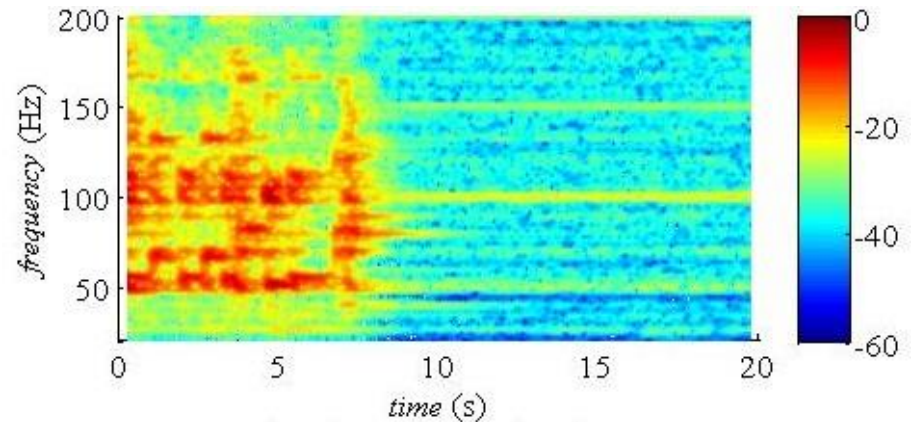
**Extrait musical
Sans absorbeurs**



Hardwalls



**Extrait musical
Avec absorbeurs**

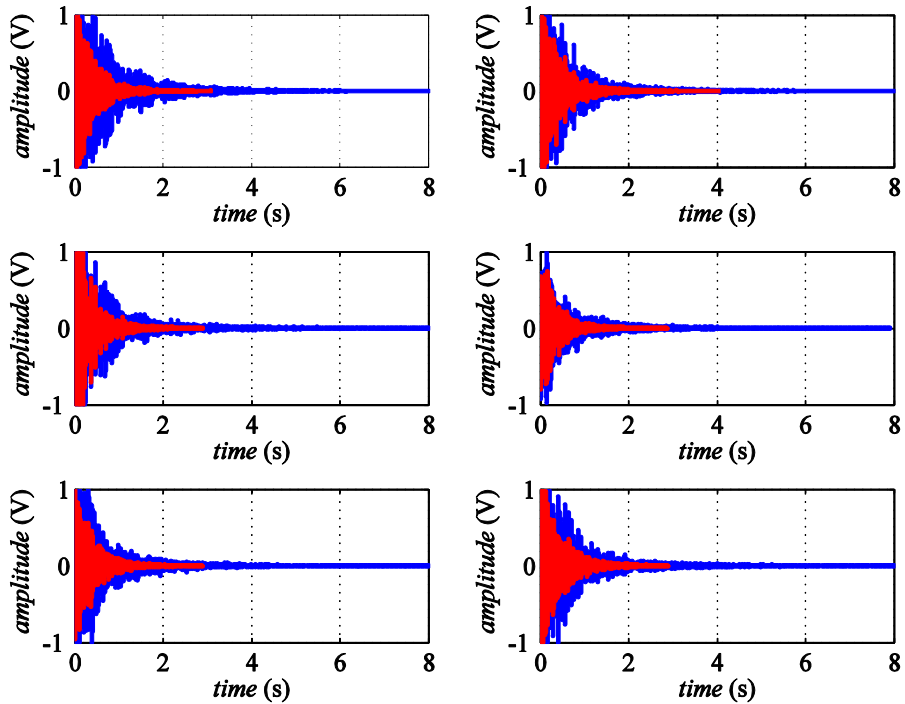


Absorbers

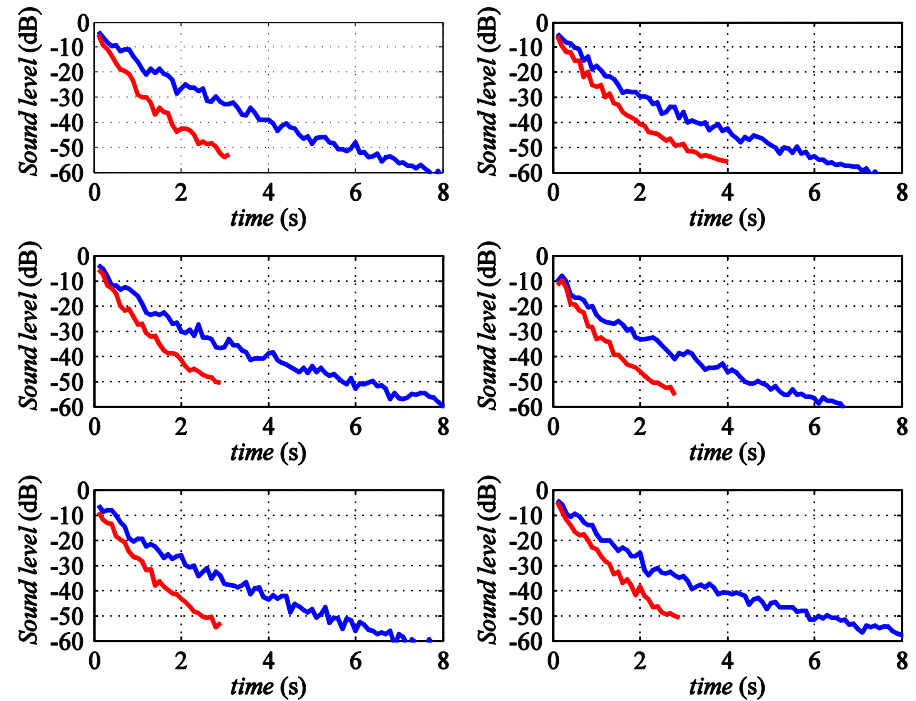


4. Grosse caisse

Formes d'ondes



Echogrammes



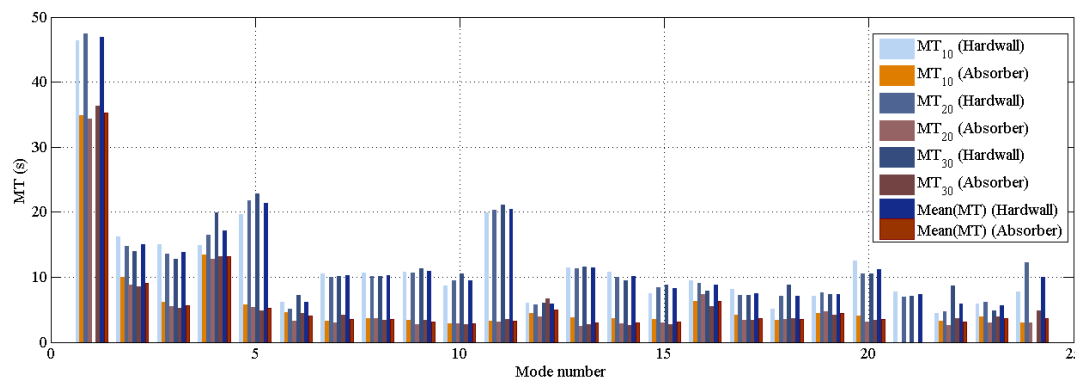
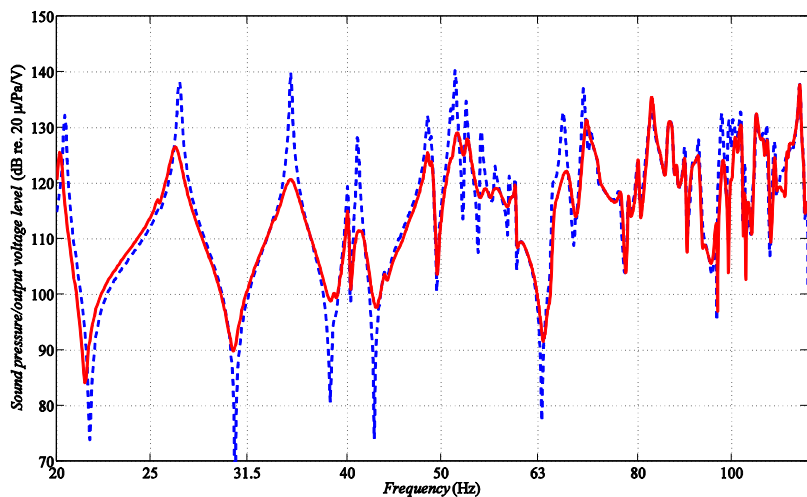
Conclusions et perspectives

Conclusions et perspectives

- Egalisation de salles aux basses fréquences
 - égalité de la réponse en fréquence et répartition spatiale
 - réduction des temps de décroissance



➔ pré-séries et produits commerciaux



h e p i a

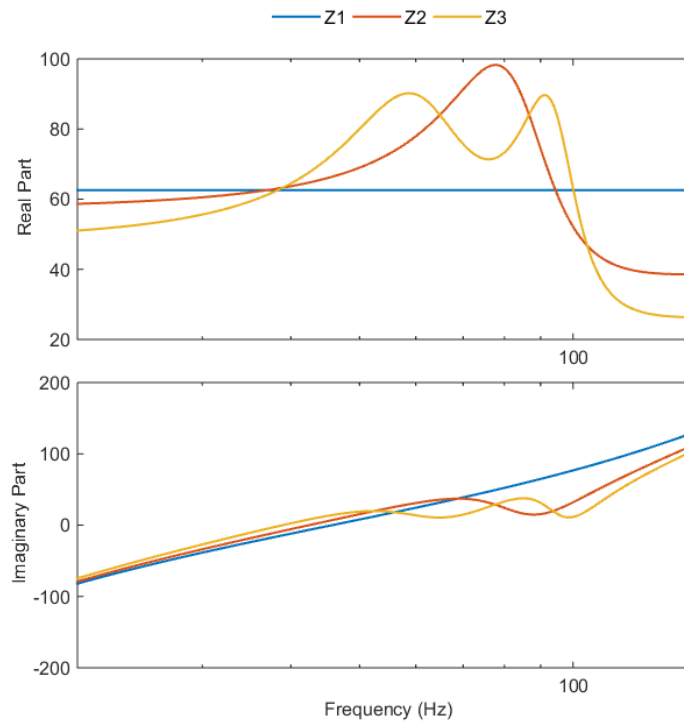
Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



...it-parleur shur ...nèse d'impédance acoustique

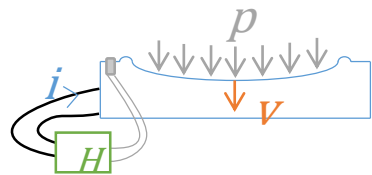
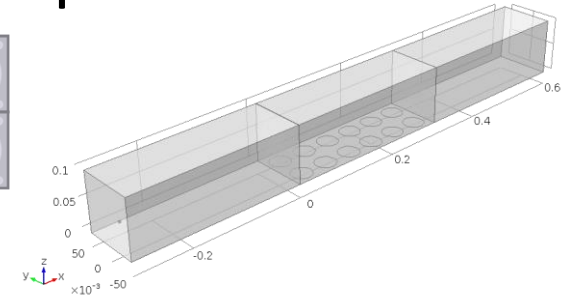
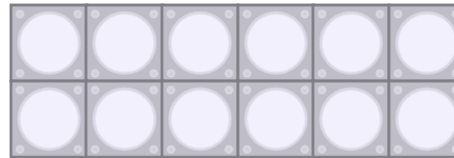
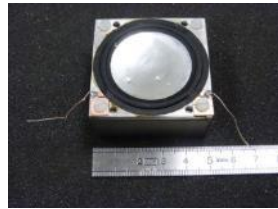
Conclusions et perspectives

- Résonateurs/absorbeurs électroacoustiques
 Résonateurs à plusieurs degrés de liberté

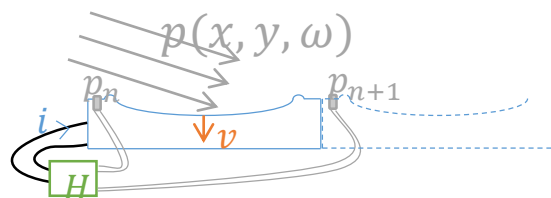


Conclusions et perspectives

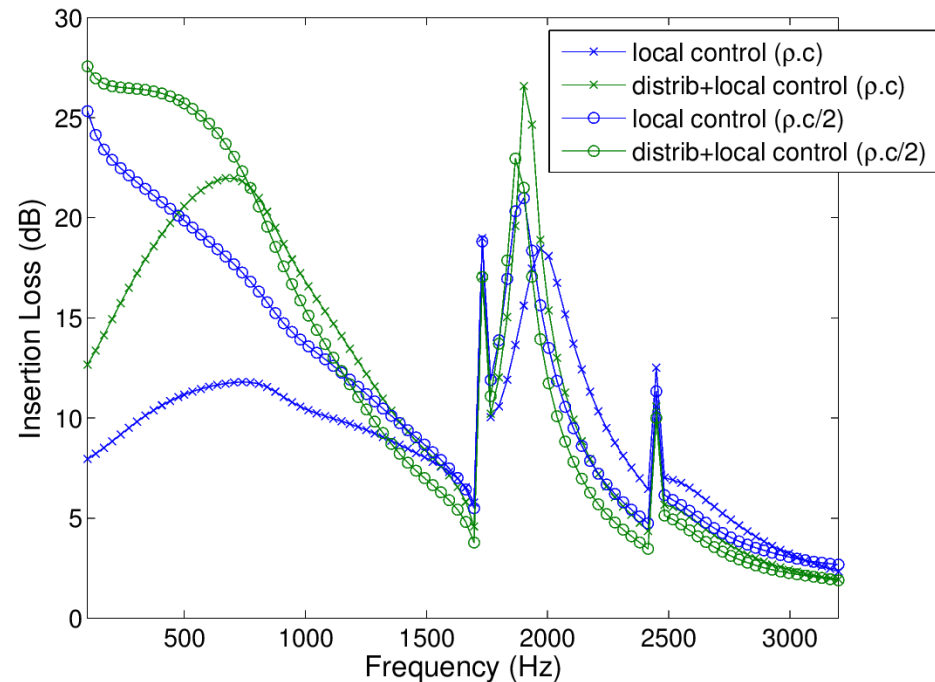
- Liners actifs pour applications aéronautiques



$$H_{loc}(\omega) = \frac{i(\omega)}{p(\omega)} = \frac{1}{Bl} \left(S_d - \frac{Z_m(\omega)}{Z_{at}(\omega)} \right)$$



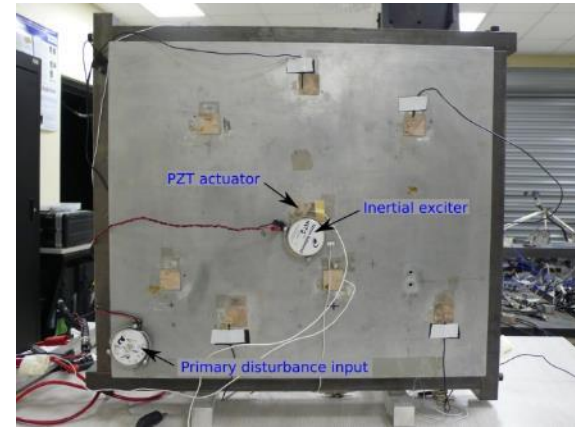
$$H_{dis}(\omega) = \frac{Z_m(\omega)}{Bl Z_{dis}(\omega)}$$



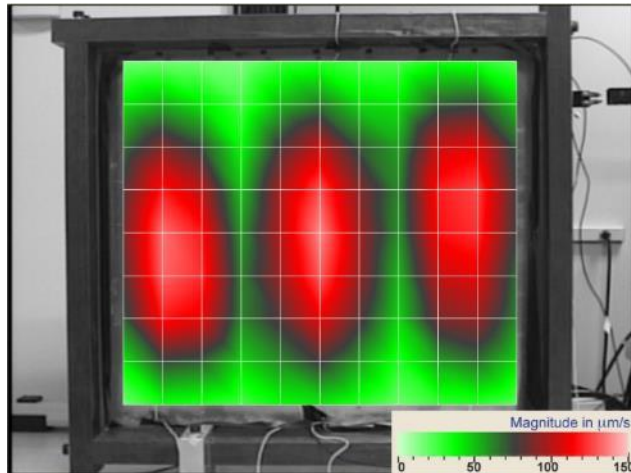
Conclusions et perspectives

- Application vibroacoustique

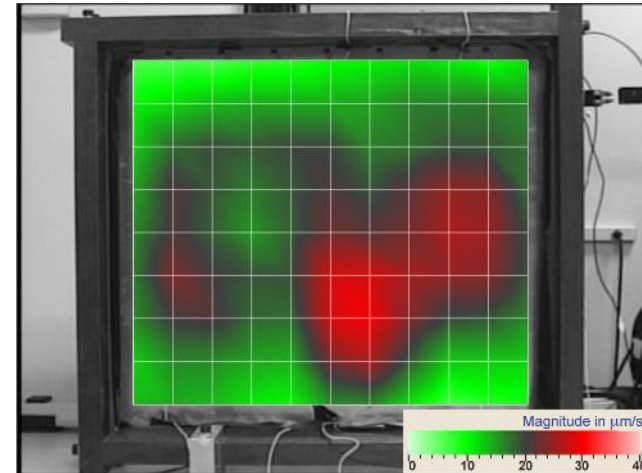
R. Boulandet, Univ. Sherbrooke



No control

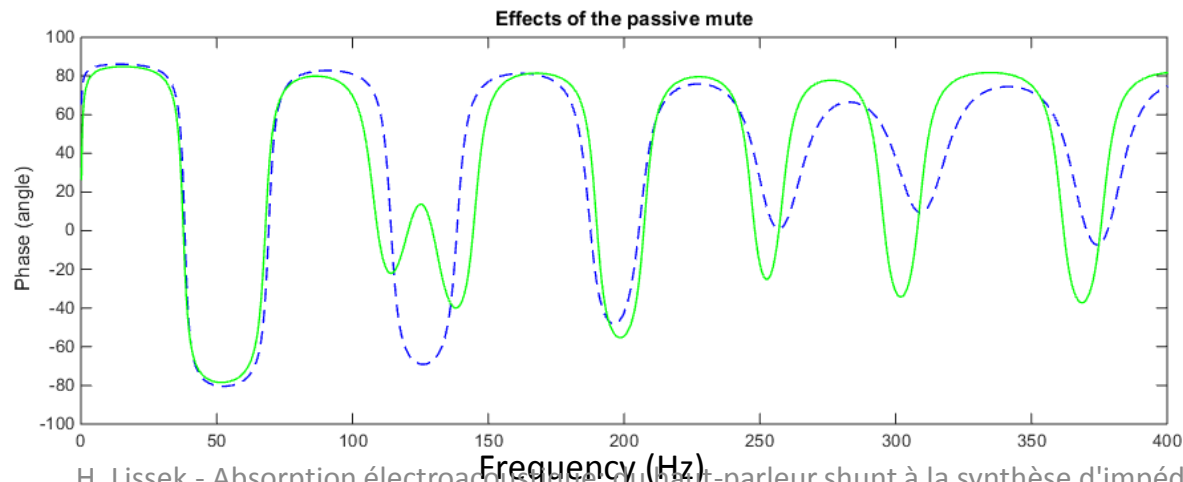
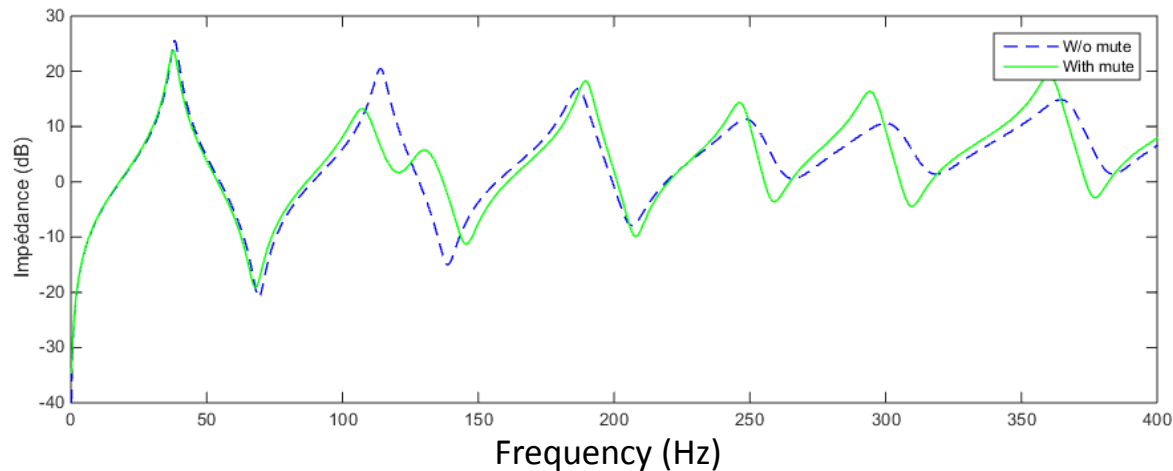


With control



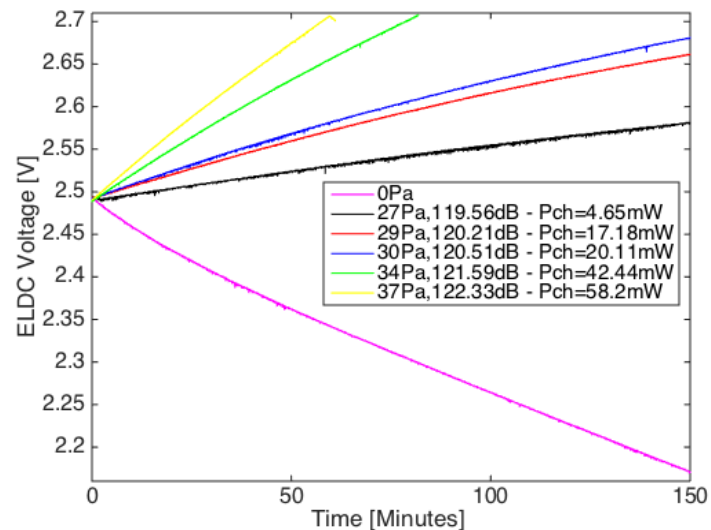
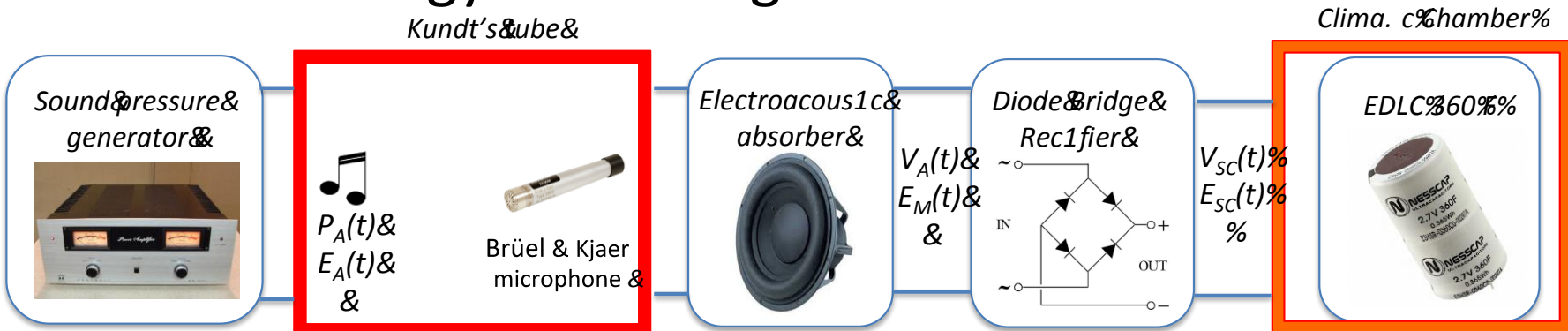
Conclusions et perspectives

- Applications musicales: sourdine active



Conclusions et perspectives

- Acoustic energy harvesting



Time evolution of ELDC voltage during different test (sound pressure ranging from 119.6 dB up to 122.3dB).



Conclusions et perspectives

- Pompage énergétique non-linéaire
... à suivre?

Merci de votre attention

Remerciement:

- Dr. Sami Karkar, Dr. Romain Boulandet, Dr. Dimitri Torregrossa, Etienne Rivet, Thach Pham Vu, Malo Grisard (EPFL)
- Véronique Adam, Torje Thorsen, Olivier Schmitt (Goldmund)
- Alain Roux, Christian Martin, Roger Roschnik (PSI Audio)
- Antoine Pittet, David Strobino (HEPIA)
- Dr. Manuel Collet (CNRS)
- Pr. Morvan Ouisse, Gaël Matten (FEMTO-ST)

contacts: herve.lissek@epfl.ch