

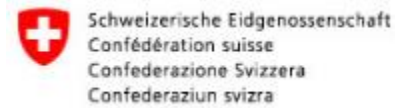


h e p i a

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



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE



ABSORBEURS ÉLECTROACOUSTIQUES ACTIFS

Application à l'égalisation des salles aux basses fréquences

Dr. Hervé Lissek
Responsable du groupe d'Acoustique
EPFL STI LTS2
herve.lissek@epfl.ch



8 et 9 JUIN 2015

Paris - Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA





Plan de la présentation

- Contexte: modes propres aux basses fréquences dans les salles
- Présentation du concept d'absorbeur électroacoustique
- Expérience d'amortissement modal en salle réverbérante





CONTEXTE: MODES PROPRES DANS LES SALLES



8 et 9 JUIN 2015

Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

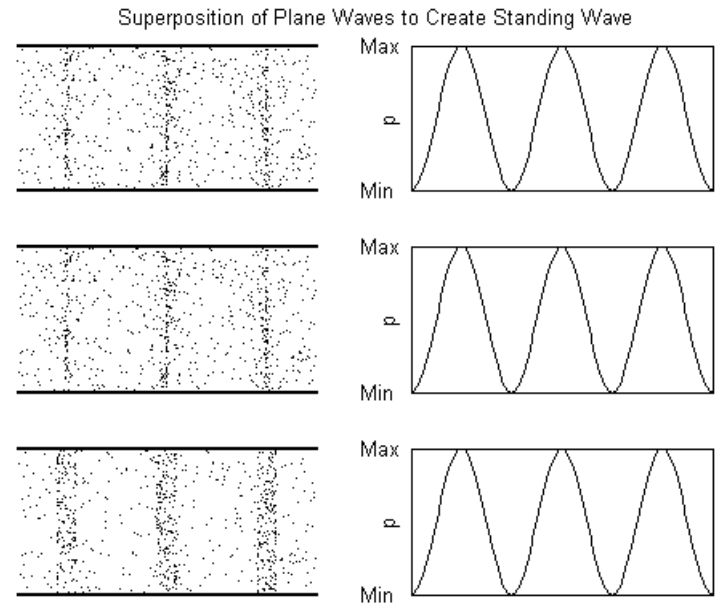
Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA





Contexte

- Les modes propres résultent des faibles facteurs d'absorption aux parois aux basses fréquences ([20 – 200 Hz])

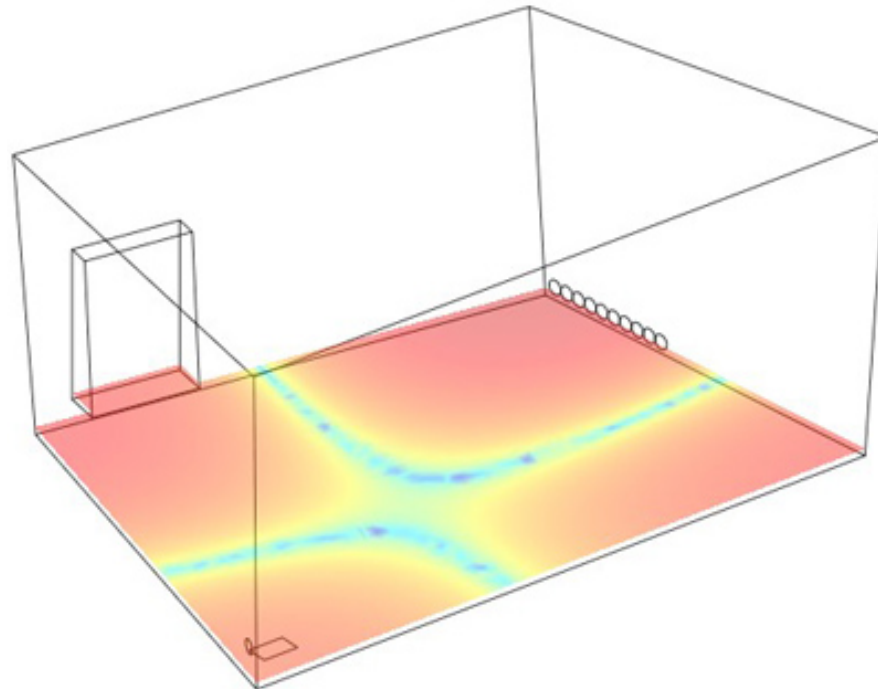


@ Ralph Muehleisen, 2006



Contexte

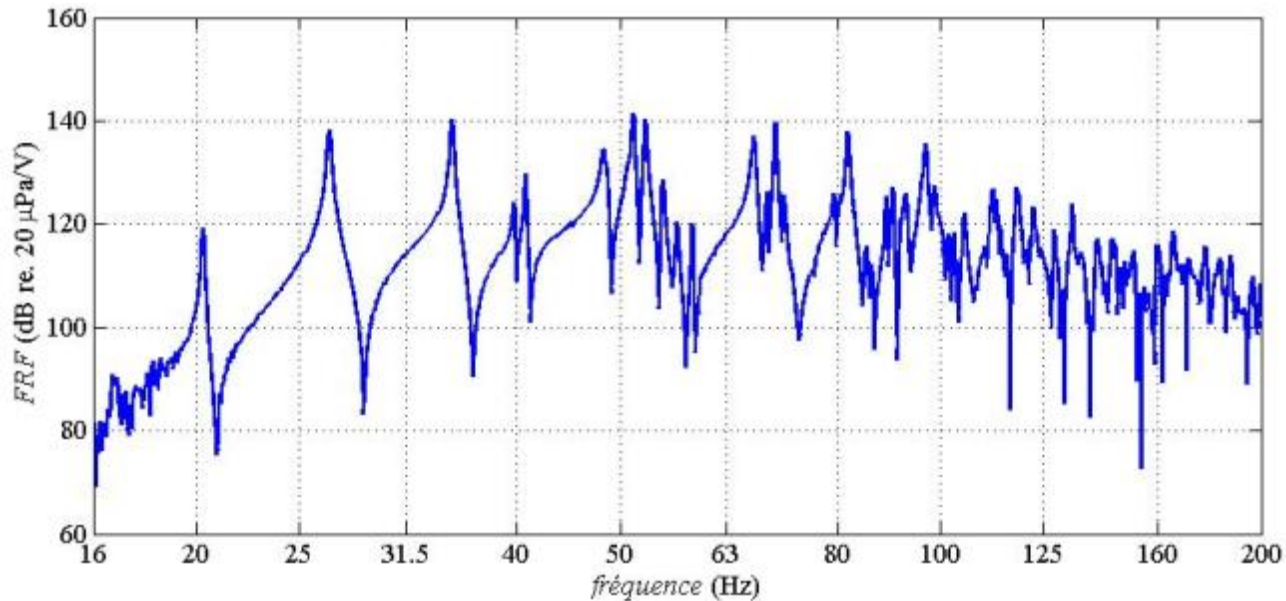
- Modes propres: caractérisation
 - Distribution spatiale de l'énergie (fonction de mode propre)





Contexte

- Modes propres: caractérisation
 - Réponse en fréquence marquée par de forts pics (résonance) et creux (antirésonances)



8 et 9 JUIN 2015

Paris - Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

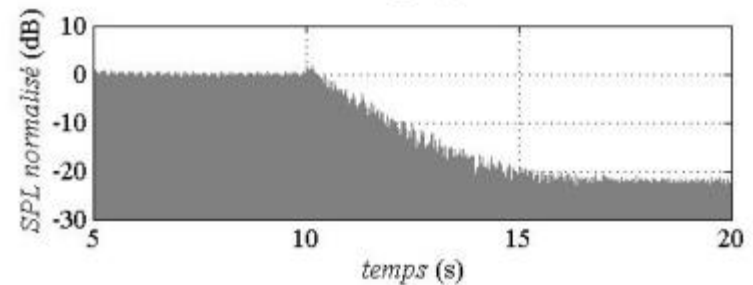
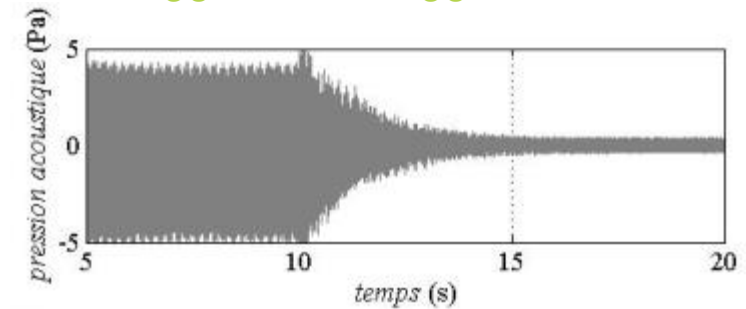
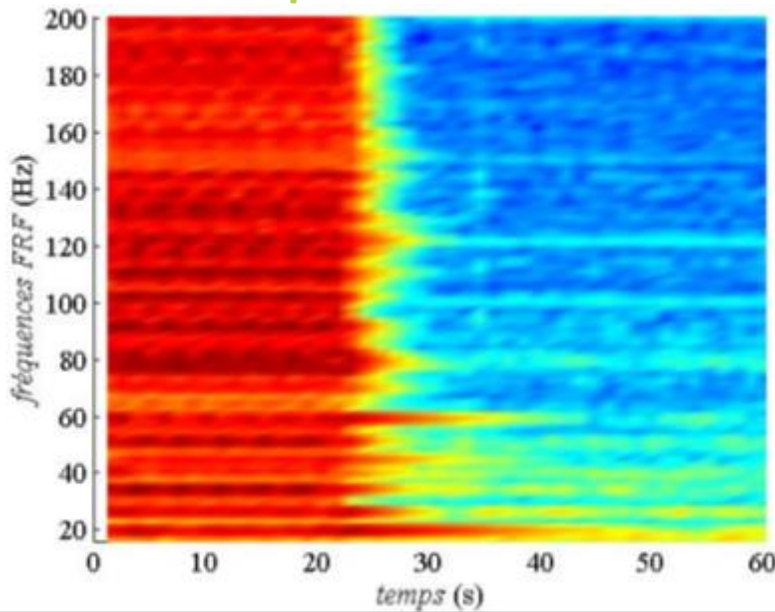
Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA





Contexte

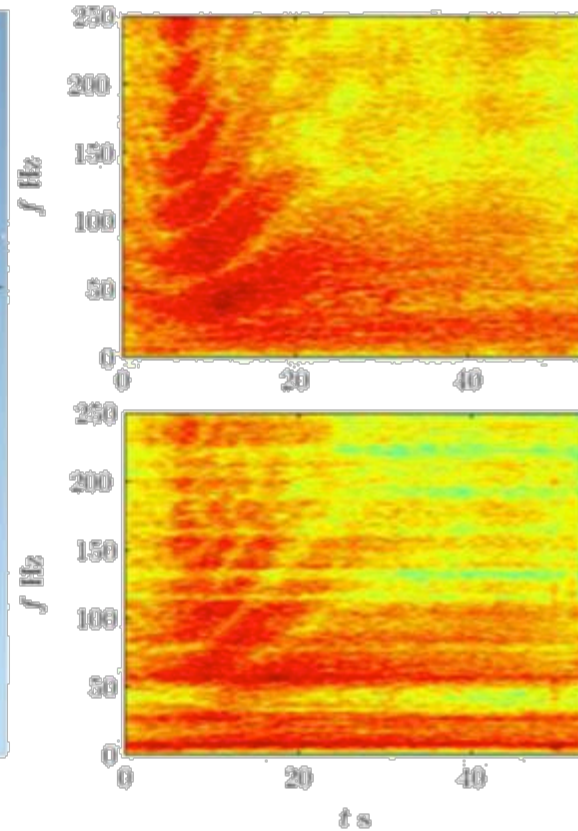
- Modes propres: caractérisation
 - Constante de temps des modes propres
 - ➔ temps d'extinction modale MT_{60} (cf. RT_{60})





Problème

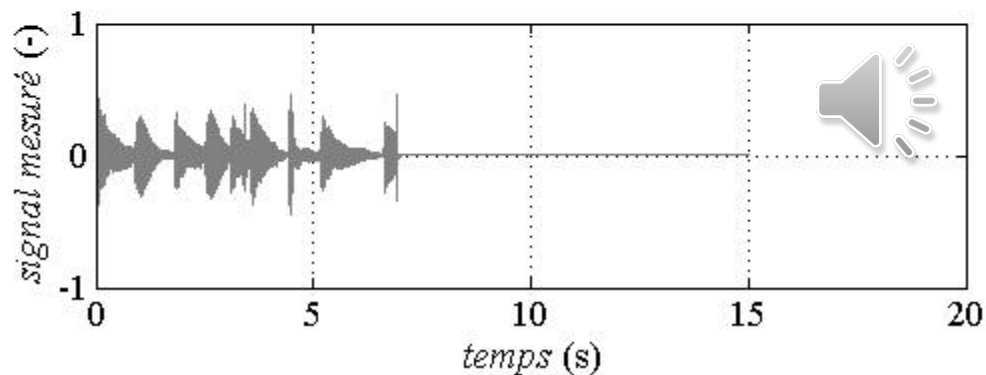
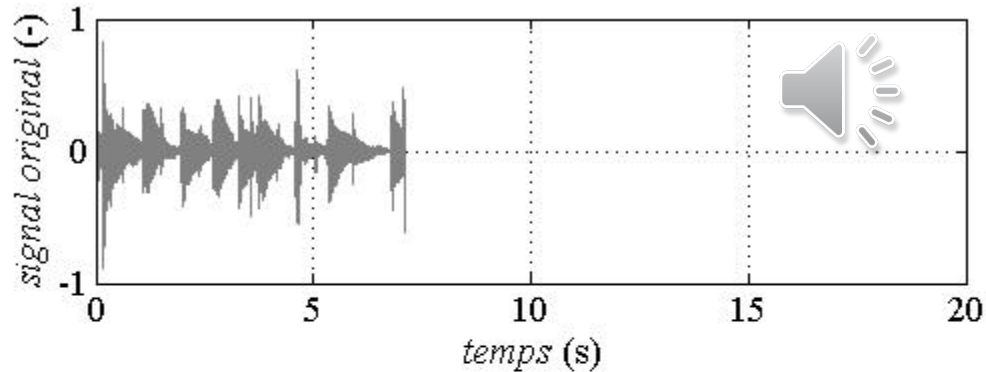
- Bruit aux basses fréquences





Problème

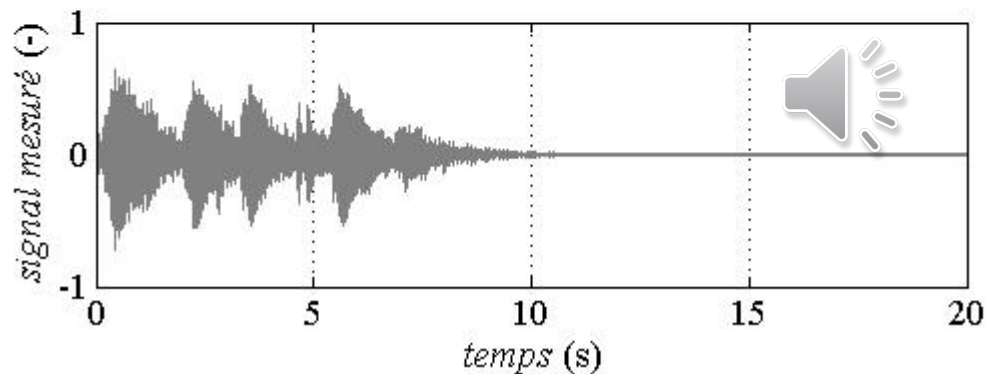
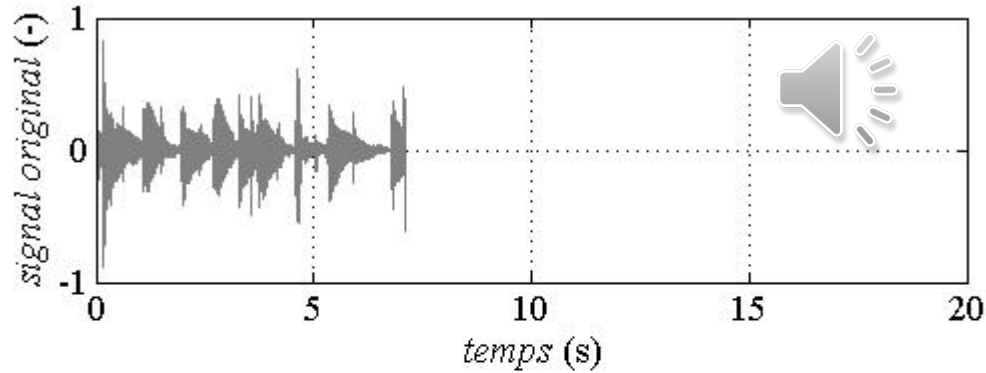
- Restitution de musique dans les graves





Problème

- Restitution de musique dans les graves

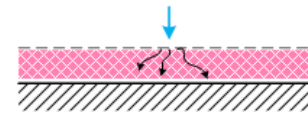
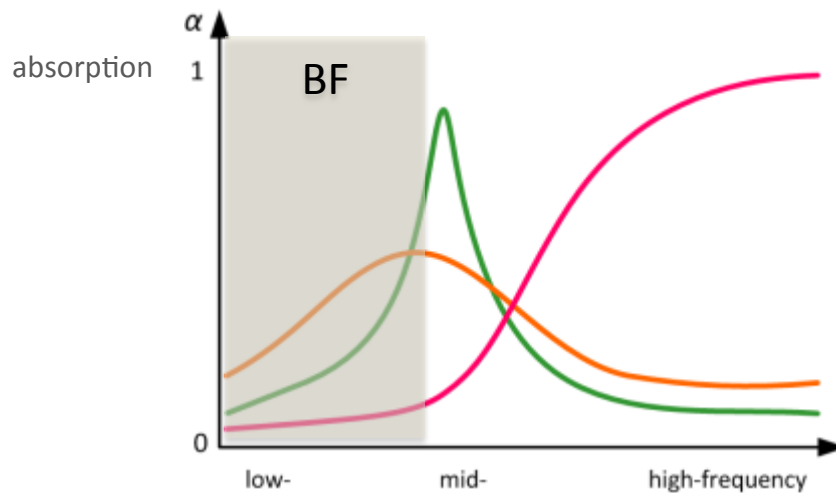




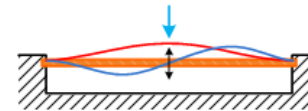
Problème

- Absorbeurs acoustiques de l'état de l'art
→ inefficaces aux BF

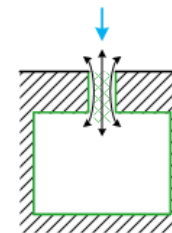
Hervé Lissek, EPFL, Suisse



Couches poreuses



Panneaux fléchissant



Résonateurs de Helmholtz



8 et 9 JUIN 2015

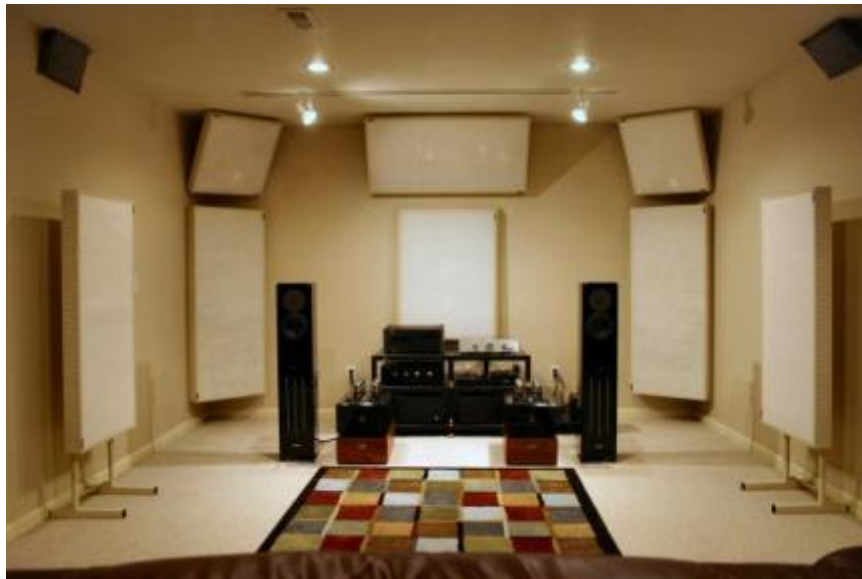
Paris - Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA



Problème

- Absorbeurs acoustiques de l'état de l'art
 - ➔ Bass-traps (absorbeurs à membrane, efficaces autour de la fréquence de résonance)



E-trap



8 et 9 JUN 2015

Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA



Objet de l'étude

- Développement d'une solution d'absorbeur acoustique actif efficace $< 200\text{Hz}$
 - Basée sur le concept d'absorbeur électroacoustique (absorbeur à membrane de haut-parleur asservie)
- Evaluation en salle réverbérante, dans le cadre de l'égalisation aux basses fréquences



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).



8 et 9 JUIN 2015

Paris - Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA





ABSORBEURS ÉLECTROACOUSTIQUES



8 et 9 JUIN 2015

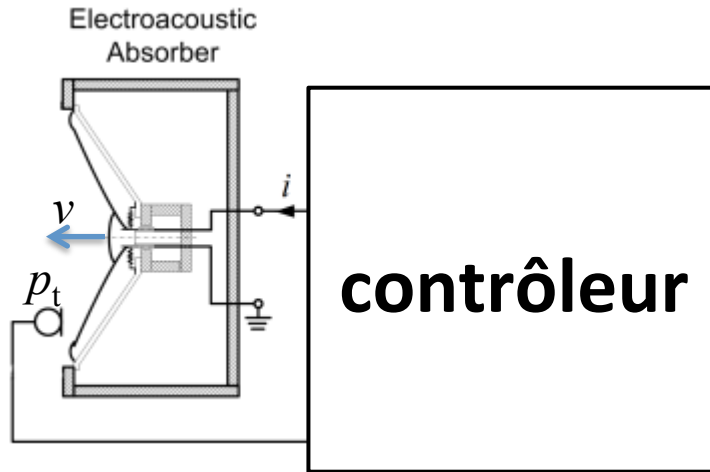
Paris - Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA





Absorbeurs électroacoustiques

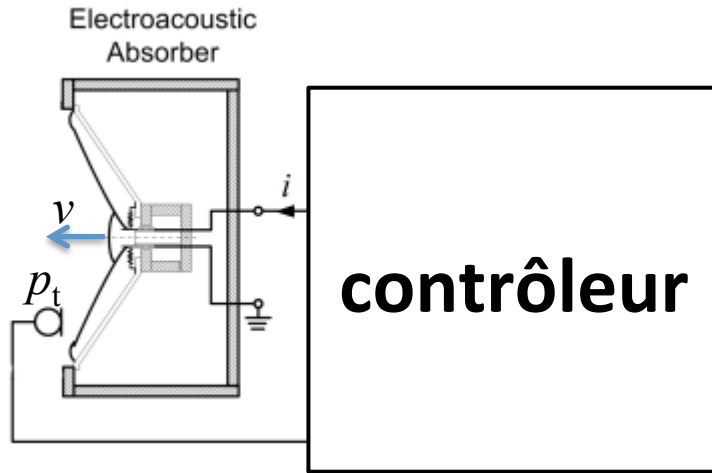


$$\begin{cases} S_d p_t = Z_m(\omega)v + Bli \\ \text{avec } Z_m(\omega) = R_{ms} + j\omega M_{ms} + \frac{1}{C_{ms}} + \frac{\rho c^2 S_d^2}{V_b} \end{cases}$$

Parameter	Description	Value	Unit
M_{ms}	Masse mobile	14.7	g
R_{ms}	Résistance mécanique	1.31	N.s.m ⁻¹
C_{ms}	Compliance mécanique	242.3	mm.N ⁻¹
S_d	Surface de la membrane	151	cm ²
Bl	Facteur de force	6.85	N.A ⁻¹
V_b	Volume de l'enceinte	10	dm ³
ρ	Masse volumique de l'air	1.2	kg/m ³
c	Célérité du son dans l'air	344	m.s ⁻¹



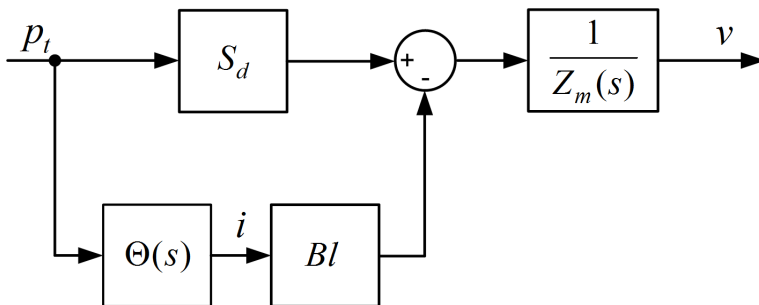
Absorbeurs électroacoustiques



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

On peut imposer une impédance désirée Z_{at} en réglant la fonction de transfert du contrôleur:

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



8 et 9 JUIN 2015

Paris - Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA



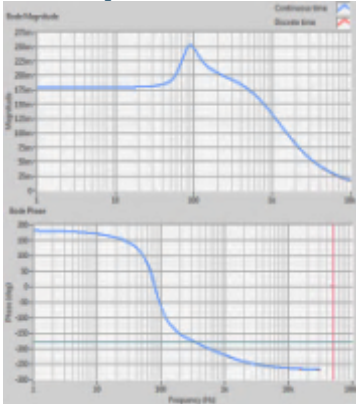
Hervé Lissek, EPFL, Suisse



Absorbeurs électroacoustiques

Implémentation

Hervé Lissek, EPFL, Suisse



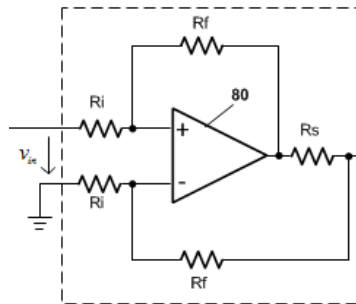
$$\Theta_p(\omega) = \frac{S_d Z_{at} - Z_m(\omega)}{Bl Z_{at}}$$

$$Z_{at} = R_{at} = r \cdot \rho c$$

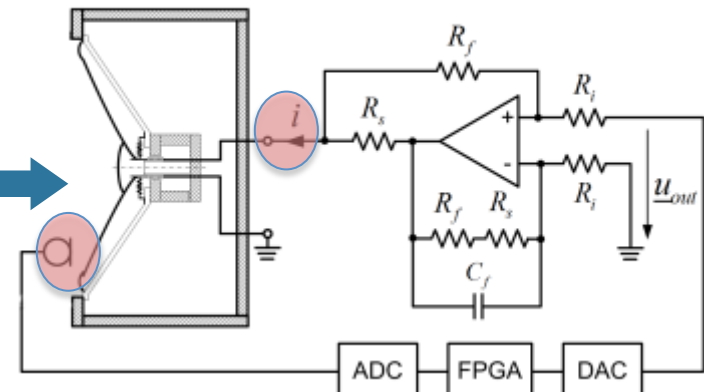
$$Z_{at} = R_{at} + j\omega M_{at} + \frac{1}{j\omega C_{at}}$$



Convertisseur tension-courant



Electroacoustic Absorber



CompactRIO® real-time controller

8 et 9 JUN 2015

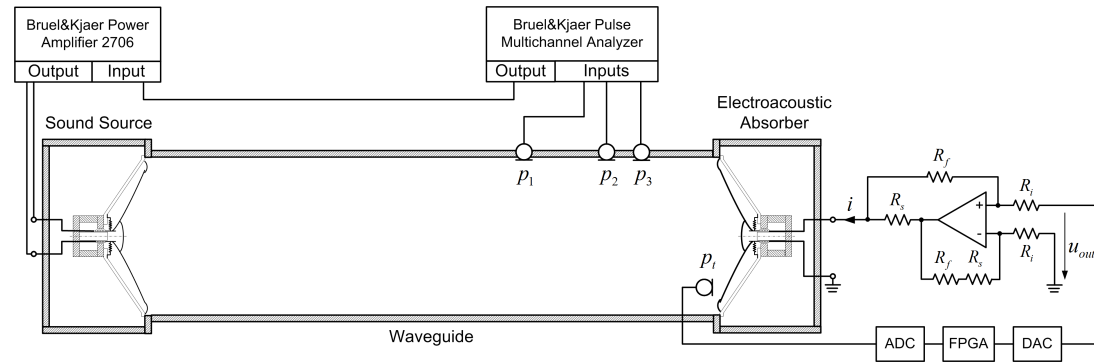
Paris - Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA



Absorbeurs électroacoustiques

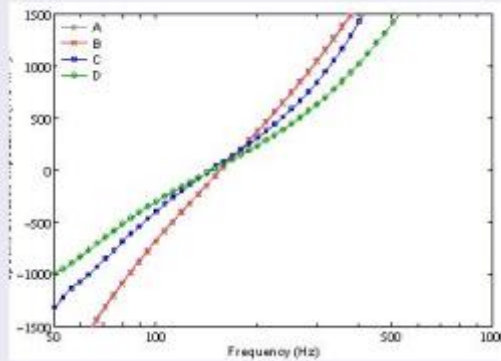
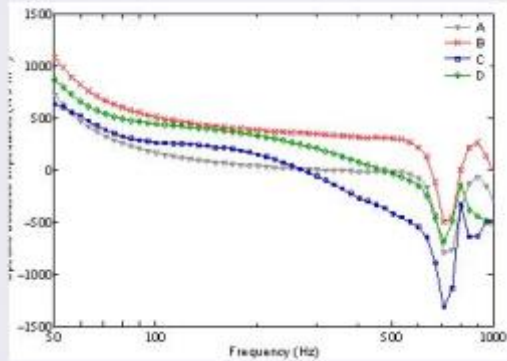
ISO 10534-2 : mesure d'impédance
acoustique en tube de Kundt



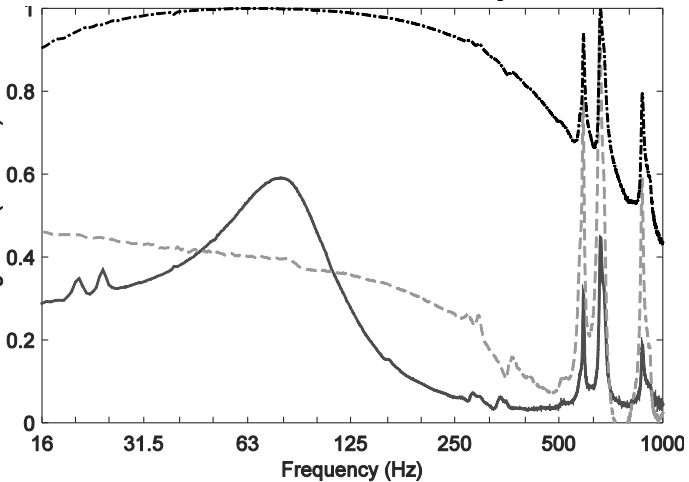
Impédance acoustique

Real part

Imaginary part



Coefficient d'absorption



Hervé Lissek, EPFL, Suisse



8 et 9 JUIN 2015

Paris - Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA





EVALUATION DES PERFORMANCES EN SALLE RÉVERBÉRANTE



8 et 9 JUIN 2015

Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA



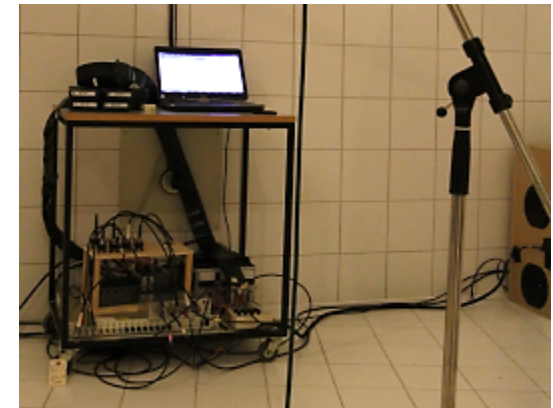
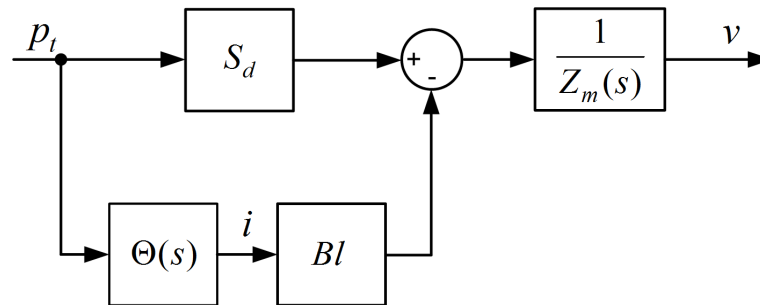
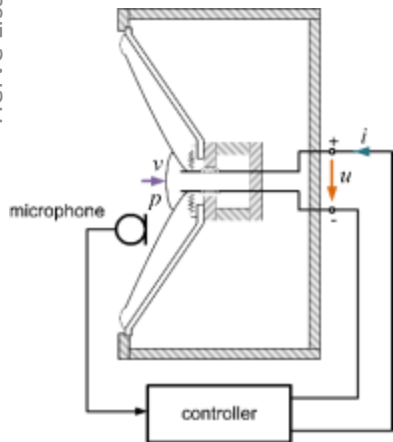


Expérience en salle réverbérante

- 4x4 absorbeurs électroacoustiques
(surface totale = $16 \times 151 \text{ cm}^2 = 0.24 \text{ m}^2$)



Hervé Lissek, EPFL, Suisse



8 et 9 JUIN 2015

Paris - Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA





Setup expérimental

Hardware

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

Microphones

PCB 130D20
(réponses fréquentielles)



Beyerdynamic M101 N
(enregistrements)



Sources

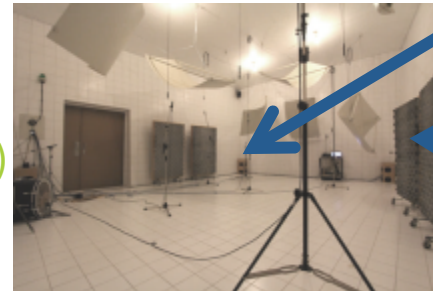
Subwoofer



Grosse caisse
(Pearl Export)



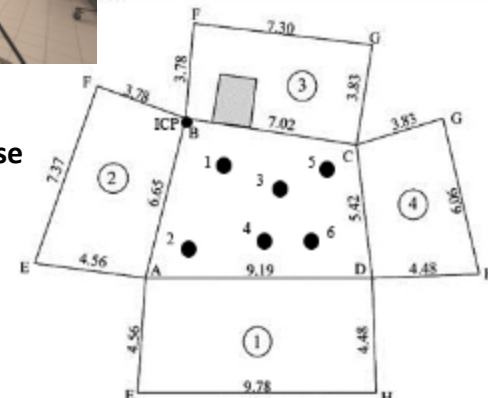
Installation (salle réverbérante,
 $V=215.6 \text{ m}^3$, $S=226.9 \text{ m}^2$)



4 absorbeurs
électroacoustiques
aux 4 coins de la salle

panneaux absorbant
supplémentaires

mesure
parcimonieuse



Id	height m	Distance to corner A m	Distance to corner B m	Distance to corner C m	Distance to corner D 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

➔ 8 et 9 JUN 2015

Paris - Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}



Résultats expérimentaux

1. Réponses en fréquence de la salle sans et avec absorbeurs
2. Enregistrements dans la salle sans et avec absorbeurs, excitée sur 24 modes identifiés dans la bande [20 – 100 Hz]
 - Formes d'ondes
 - Temps d'extinction des modes
3. Enregistrements dans la salle sans et avec absorbeurs, avec diffusion d'extraits musicaux
4. Enregistrements dans la salle sans et avec absorbeurs, avec kicks de grosse caisse
 - Formes d'ondes
 - Temps d'extinction

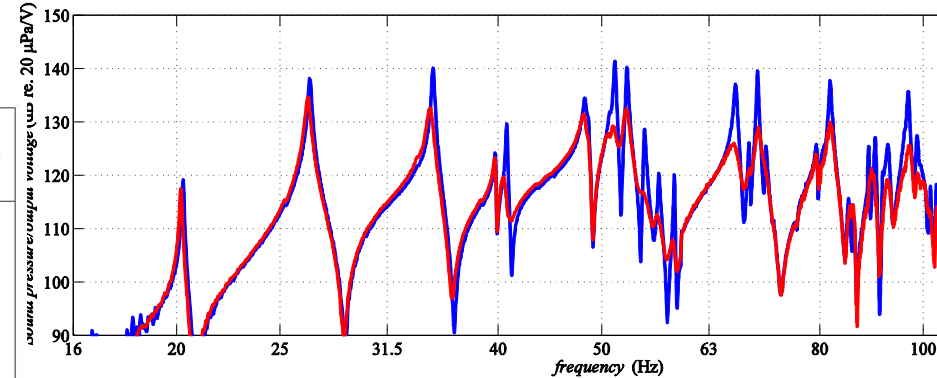




1. Réponse en fréquence

Hervé Lissek, EPFL, Suisse

Mode	Hardwalls		4 Absorbers		Difference	
	Frequency (Hz)	Sound level (dB)	Frequency (Hz)	Sound level (dB)	Frequency (Hz)	Sound level (dB)
1	20.28	119.2	20.19	117.5	- 0.09	-1.7
2	26.63	138.2	26.53	134.7	-0.10	-3.5
3	34.75	140.2	34.53	132.7	-0.22	-7.5
4	39.72	124.3	39.69	123.3	-0.03	-1.0
5	40.75	129.7	40.44	119.7	-0.31	-10.0
6	48.19	134.5	48.09	131.5	-0.10	-3.0
7	51.44	141.4	51.25	129.2	-0.19	-12.2
8	52.78	140.3	52.72	132.5	-0.06	-7.8
9	54.84	128.7	54.66	116.7	-0.18	-12.0
10	56.53	120.4	56.34	112.7	-0.19	-7.7
11	58.44	120.1	58.22	107.9	-0.22	-12.2
12	66.72	137.1	66.41	125.9	-0.31	-11.2
13	68.66	126.1	68.72	121.3	+0.06	-4.8
14	69.94	139.6	70.09	129.1	+0.15	-10.5
15	71.22	125.5	71.22	120.7	0.00	-4.8
16	79.38	125.9	79.31	124.0	-0.07	-1.9
17	81.78	137.8	81.75	130.0	-0.03	-7.8
18	85.09	115.7	85.38	114.3	+0.29	-1.4
19	86.13	112.2	85.94	114.6	-0.19	+2.4
20	88.88	125.4	89.41	121.3	+0.53	-4.1
21	90.16	127.1	-	-	-	-
22	92.63	125.8	92.66	119.1	+0.03	-6.7
23	96.84	135.7	96.88	125.6	+0.04	-10.1
24	98.69	127.5	98.88	120.2	+0.19	-7.3



(blue: «Hardwalls», red: «Absorbers»)



8 et 9 JUN 2015

Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA

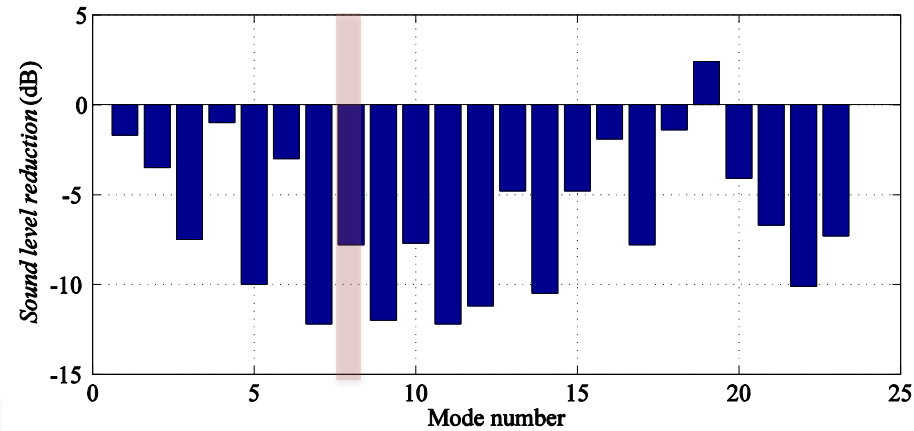




1. Amortissement des modes

Hervé Lissek, EPFL, Suisse

Mode	Hardwalls		4 Absorbers		Difference	
	Frequency (Hz)	Sound level (dB)	Frequency (Hz)	Sound level (dB)	Frequency (Hz)	Sound level (dB)
1	20.28	119.2	20.19	117.5	- 0.09	-1.7
2	26.63	138.2	26.53	134.7	-0.10	-3.5
3	34.75	140.2	34.53	132.7	-0.22	-7.5
4	39.72	124.3	39.69	123.3	-0.03	-1.0
5	40.75	129.7	40.44	119.7	-0.31	-10.0
6	48.19	134.5	48.09	131.5	-0.10	-3.0
7	51.44	141.4	51.25	129.2	-0.19	-12.2
8	52.78	140.3	52.72	132.5	-0.06	-7.8
9	54.84	128.7	54.66	116.7	-0.18	-12.0
10	56.53	120.4	56.34	112.7	-0.19	-7.7
11	58.44	120.1	58.22	107.9	-0.22	-12.2
12	66.72	137.1	66.41	125.9	-0.31	-11.2
13	68.66	126.1	68.72	121.3	+0.06	-4.8
14	69.94	139.6	70.09	129.1	+0.15	-10.5
15	71.22	125.5	71.22	120.7	0.00	-4.8
16	79.38	125.9	79.31	124.0	-0.07	-1.9
17	81.78	137.8	81.75	130.0	-0.03	-7.8
18	85.09	115.7	85.38	114.3	+0.29	-1.4
19	86.13	112.2	85.94	114.6	-0.19	+2.4
20	88.88	125.4	89.41	121.3	+0.53	-4.1
21	90.16	127.1	-	-	-	-
22	92.63	125.8	92.66	119.1	+0.03	-6.7
23	96.84	135.7	96.88	125.6	+0.04	-10.1
24	98.69	127.5	98.88	120.2	+0.19	-7.3



8 et 9 JUN 2015

Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA

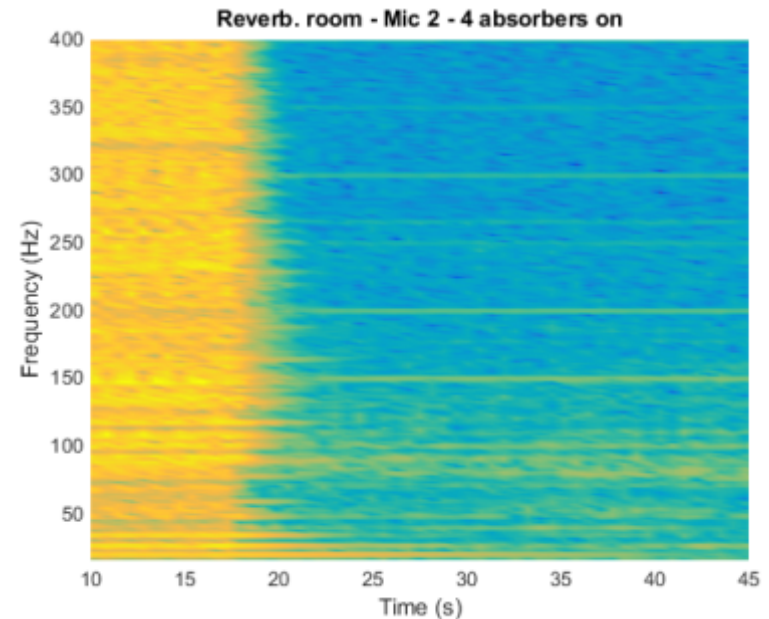
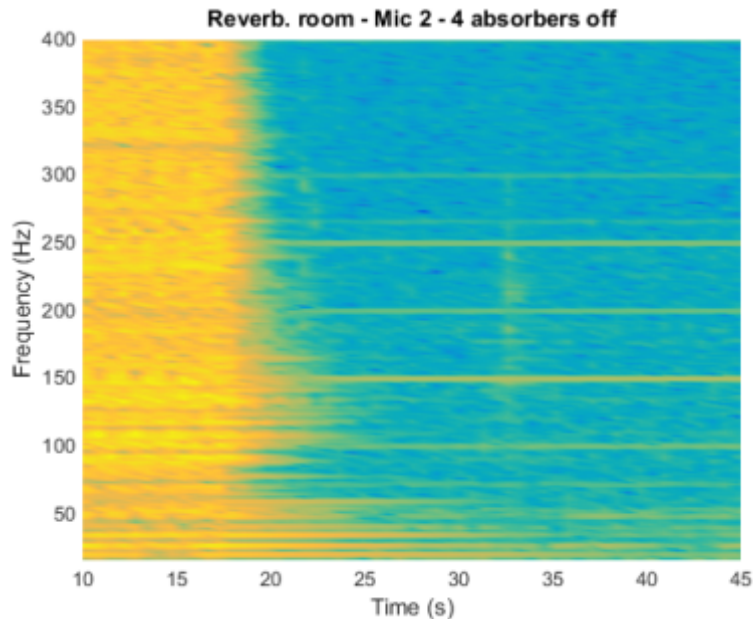




1. Amortissement des modes

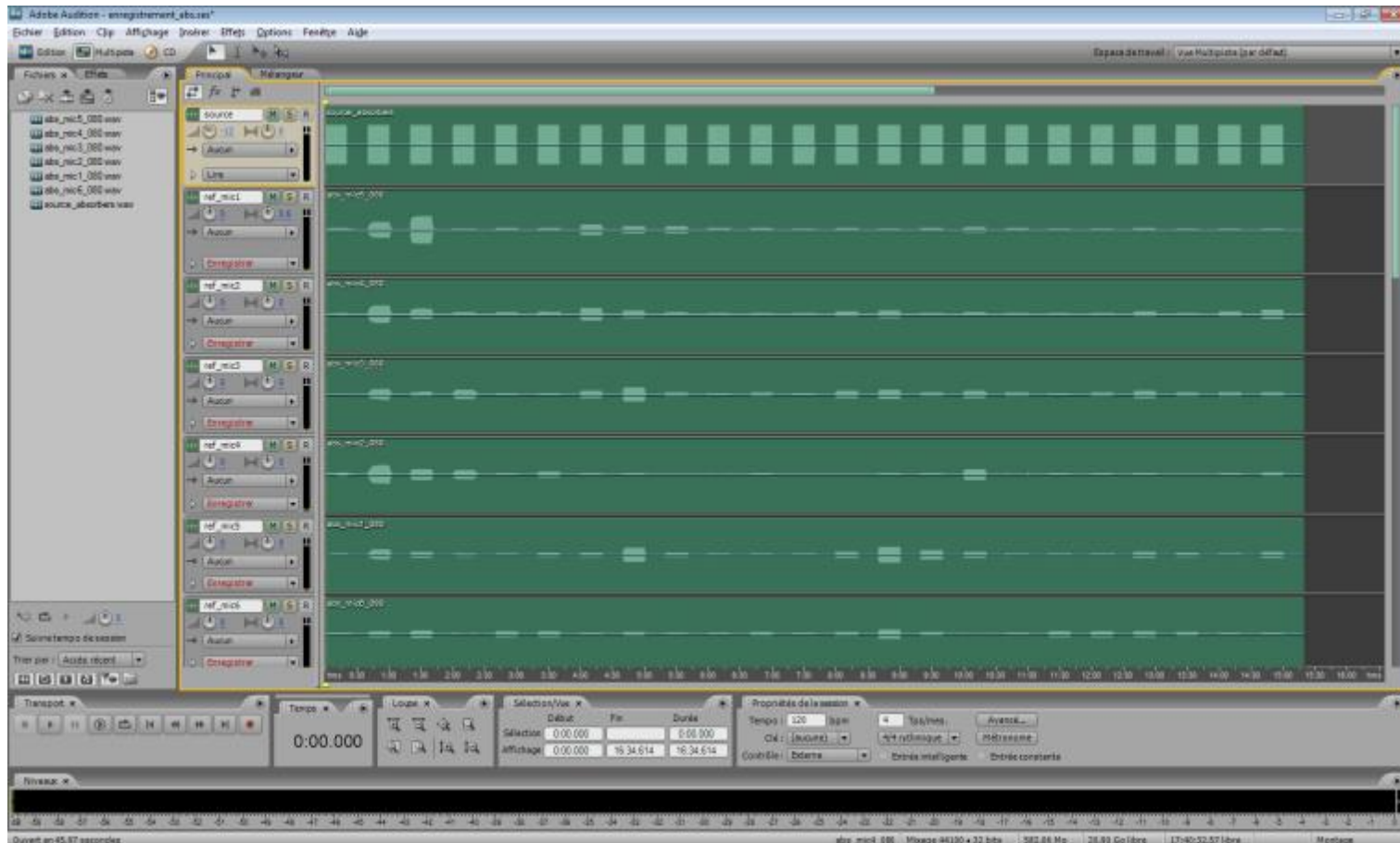
4 absorbeurs électroacoustiques off

4 absorbeurs électroacoustiques on





2. Caractérisation temporelle des modes propres



Hervé Lissek, EPFL, Suisse



8 et 9 JUN 2015

Paris - Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA

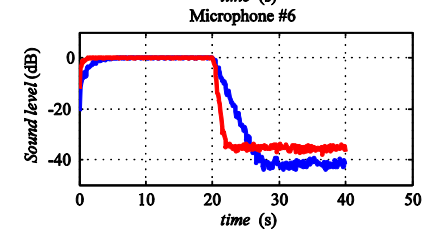
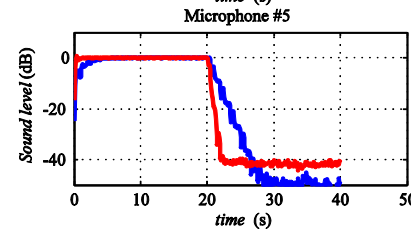
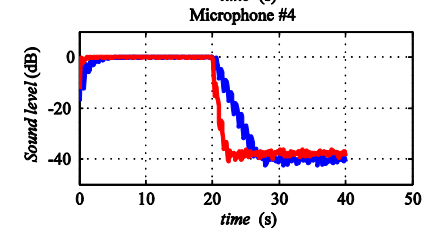
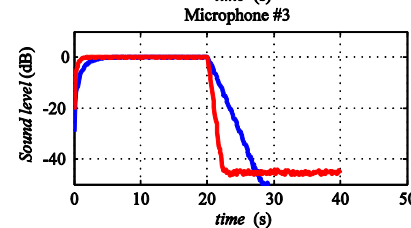
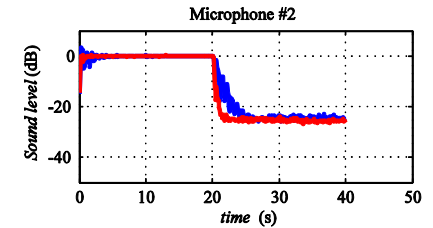
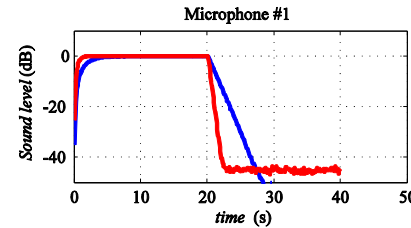
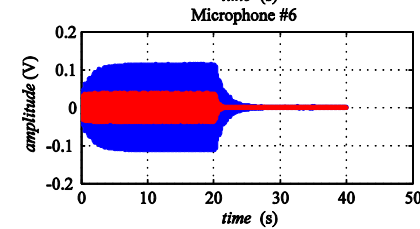
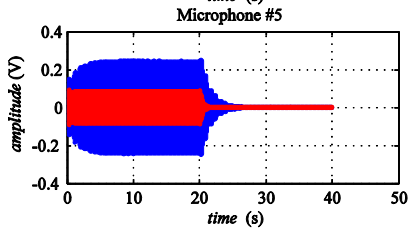
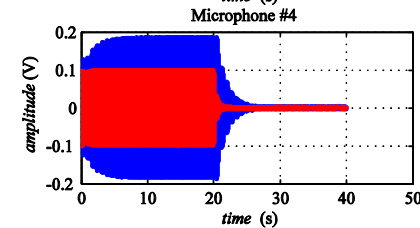
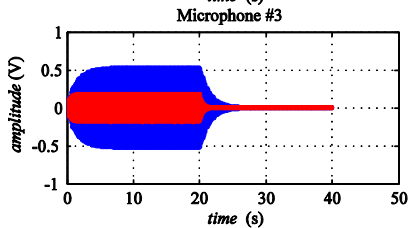
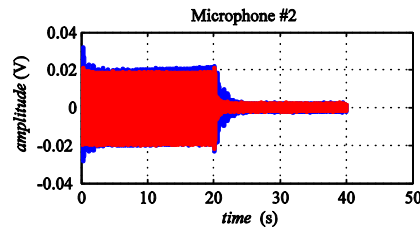
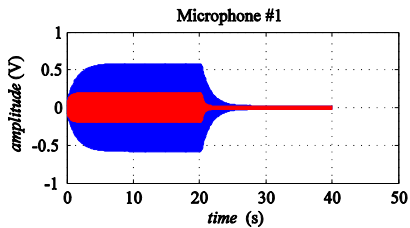




2. Caractérisation temporelle des modes propres formes d'onde

Mode 8 - formes d'onde
(hardwalls : 52.78 Hz - absorbers : 52.72 Hz)

Mode 8 - échogrammes
(hardwalls : 52.78 Hz - absorbers : 52.72 Hz)



Hardwalls (mic 1)



Absorbers (mic 1)



8 et 9 JUN 2015

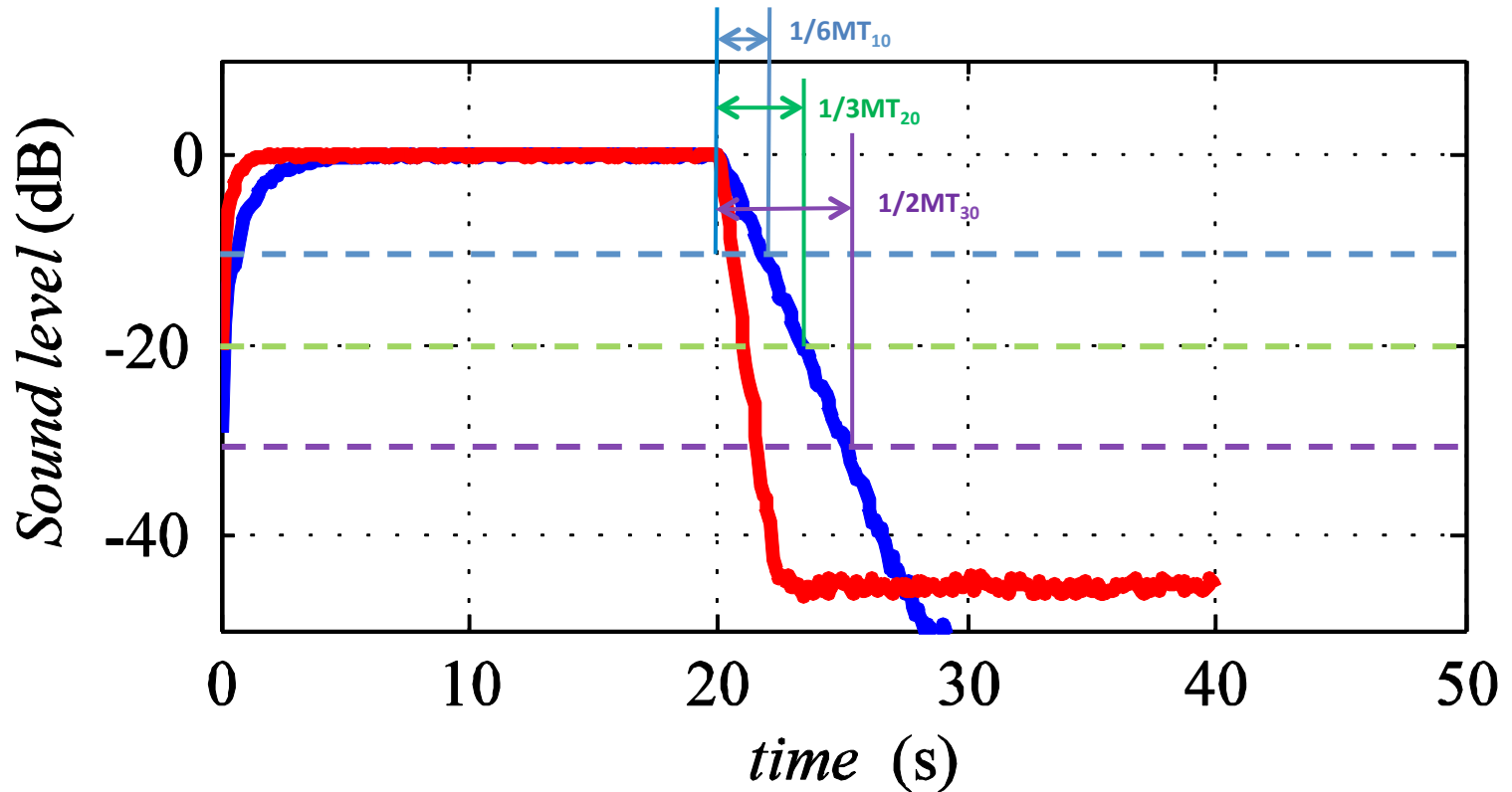
Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA





2. Caractérisation temporelle des modes propres extinction des modes





2. Caractérisation temporelle des modes propres extinction des modes

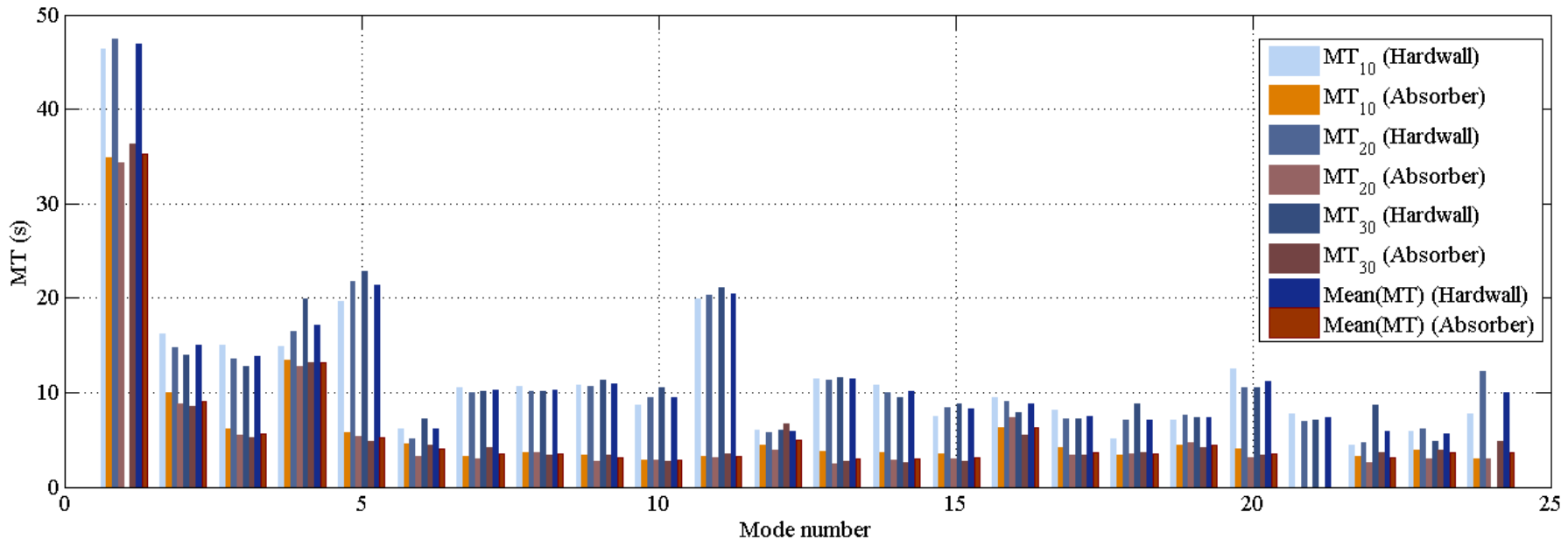
Mode	Hardwalls				4 Absorbers			
	Frequency (Hz)	MT10 (s)	MT20 (s)	MT30 (s)	Frequency(Hz)	MT10 (s)	MT20 (s)	MT30 (s)
1	20.88	46.30	47.40	NaN	20.19	34.90	34.35	36.33
2	26.63	16.20	14.70	14.00	26.53	10.00	8.85	8.47
3	34.75	15.00	13.60	12.83	34.53	6.20	5.45	5.17
4	39.72	14.90	16.50	19.87	39.69	13.40	12.75	13.20
5	40.75	19.70	21.80	22.77	40.44	5.70	5.33	4.80
6	48.13	6.20	5.05	7.20	48.09	4.50	3.25	4.44
7	51.44	10.50	10.05	10.10	51.25	3.20	3.00	3.40
8	52.78	10.60	10.10	10.16	52.72	3.70	3.60	3.40
9	54.84	10.80	10.60	11.37	54.66	3.40	2.70	3.36
10	56.53	8.60	9.45	10.5	56.34	2.80	2.88	2.70
11	58.44	19.90	20.25	21.13	58.22	3.30	3.15	3.47
12	66.72	6.00	5.80	6.00	60.50	4.40	3.84	6.70
13	68.66	11.40	11.30	11.60	68.72	3.80	2.46	2.68
14	69.94	10.80	10.00	9.44	70.09	3.70	2.85	2.55
15	71.22	7.50	8.35	8.80	71.22	3.50	3.00	2.75
16	79.38	9.50	9.00	7.92	79.31	6.24	7.30	5.45
17	81.78	8.10	7.15	7.20	81.75	4.20	3.36	3.33
18	85.09	5.10	7.10	8.85	85.38	3.40	3.55	3.70
19	86.13	7.10	7.60	7.35	85.94	4.40	4.75	4.20
20	88.88	12.50	10.55	10.57	89.41	4.00	3.05	3.40
21	90.16	7.80	6.95	7.10	-	-	-	-
22	92.63	4.40	4.65	8.60	92.66	3.24	2.58	3.60
23	96.84	5.90	6.15	4.80	96.88	3.90	3.00	3.90
24	98.69	7.80	12.30	NaN	98.88	3.00	3.00	4.80





2. Caractérisation temporelle des modes propres extinction des modes

Hervé Lissek, EPFL, Suisse



8 et 9 JUIN 2015

Paris - Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA

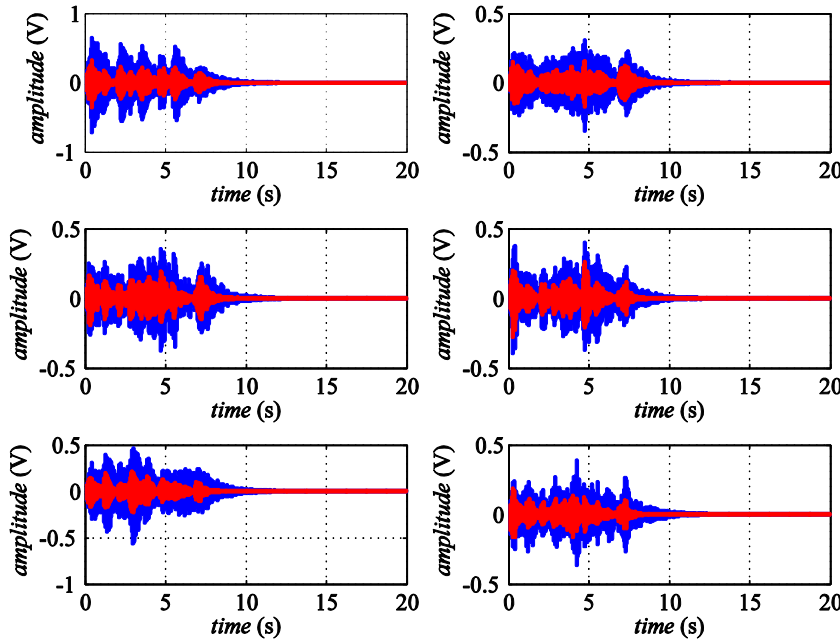




3. Diffusion de musique

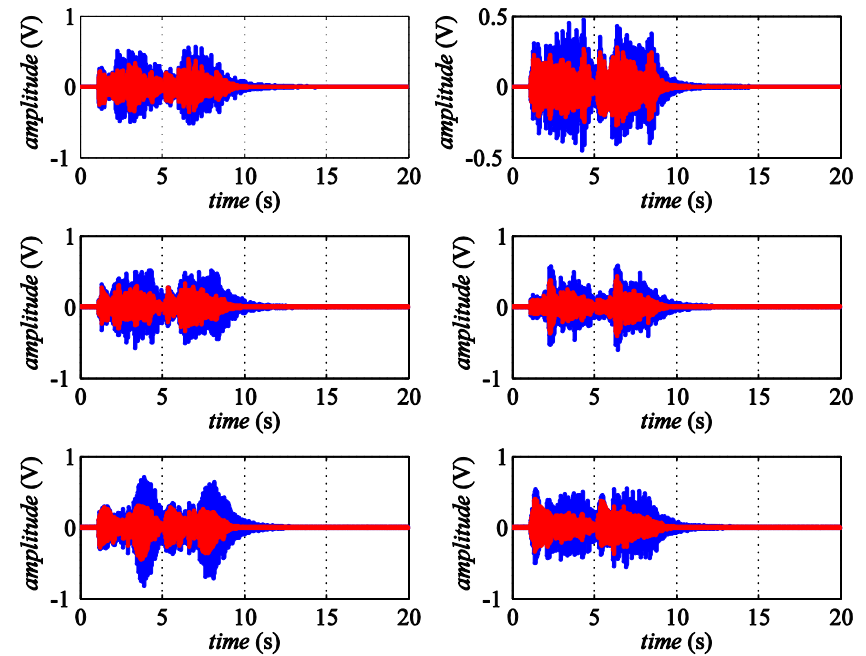
Quelle est la « fréquence » ?

Quelle est la « motivation » ?



Hardwalls (mic 5)

Absorbers (mic 5)



Hardwalls (mic 5)

Absorbers (mic 5)



8 et 9 JUN 2015

Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA

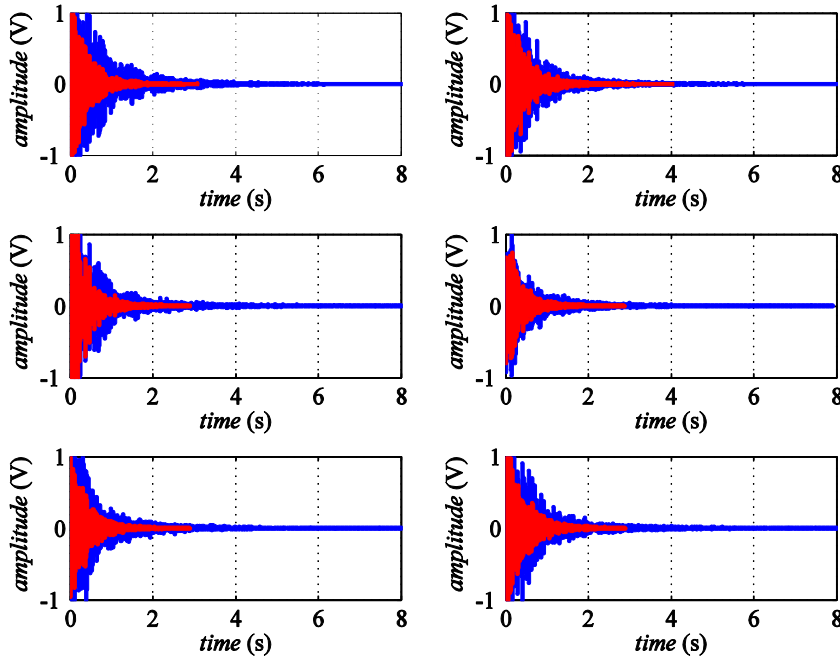


Hervé Lissek, EPFL, Suisse



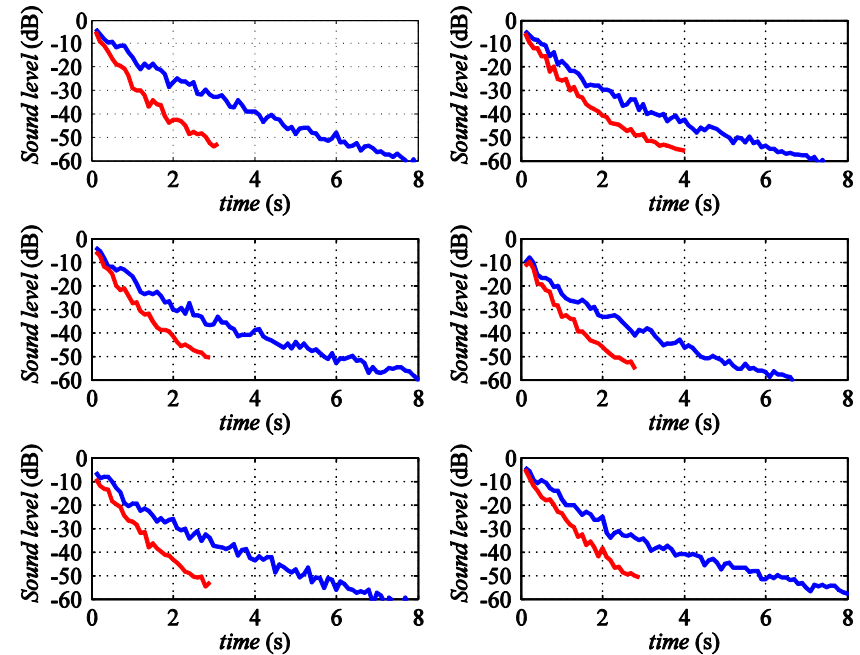
4. Kick de grosse caisse

Formes d'onde



Hardwalls (mic 1)

Extinction



Absorbers (mic 1)



8 et 9 JUIN 2015

Paris - Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA





Conclusions et perspectives

- 4 absorbeurs électroacoustiques permettent une atténuation efficace des modes propres de la salle réverbérante
 - Atténuation max de 12.2 dB à 58 Hz,
 - Atténuation globale de 8 dB sur [20 – 100 Hz],
 - Réduction du temps d'extinction des modes maximale à 58 Hz (passe de 20s pour la salle nue à 3s avec les absorbeurs),
 - Distribution d'énergie plus homogène dans la salle (conséquence triviale mais pas mesurée...),

avec une surface d'absorption représentant seulement 0.1% de la surface totale de la salle



8 et 9 JUIN 2015

Paris - Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

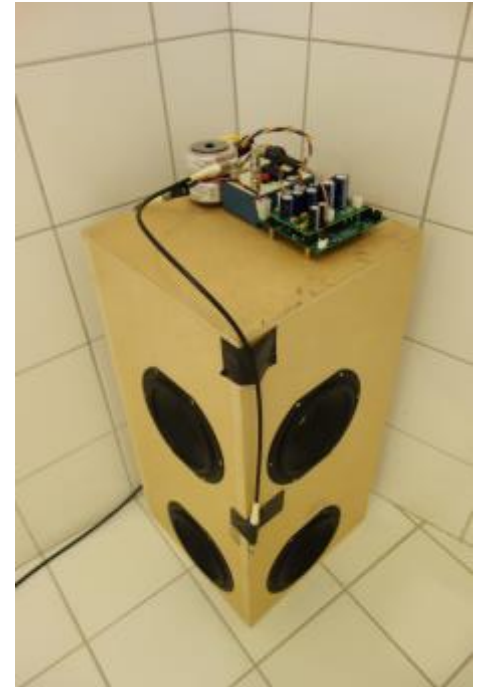
Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA





Conclusions et perspectives

- Un nouveau prototype a été développé sur DSP, avec une efficacité encore améliorée mesurée en tube de Kundt (bruit résiduel, stabilité);
- Une méthode d'évaluation à plusieurs microphones est en cours
- Les performances objectives doivent être encore évaluées dans une salle d'écoute;
- Une évaluation subjective doit être menée dans les prochaines semaines.





Conclusions et perspectives

- Workshop «All About That Bass» au Montreux Jazz Festival le 15 juillet 2015 à 13h
(avec démonstrations)



<http://www.montreuxjazzfestival.com/fr/artist/all-about-bass>



8 et 9 JUIN 2015

Paris - Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA





Conclusions et perspectives

Hervé Lissek, EPFL, Suisse



Jeudi 11.6.2015
Studio Davout
11h, 14h et 16h

Présentations:

- AVAA (absorbeur actif)
- moniteurs de studio compensés en phase



PSI AUDIO présentera, avec la société 44.1, l'AVAA (Active Velocity Acoustic Absorber) au Studios Davout à Paris (Studio B).

Les séances auront lieu à 11h, 14h et 16.

L'inscription est gratuite, veuillez uniquement communiquer votre participation.

<https://www.facebook.com/psiaudio?ref=ts&fref=ts>

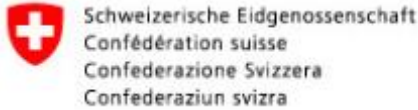


8 et 9 JUIN 2015

Paris - Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA





Ce travail a été financé par la Commission pour la Technologie et l'Innovation (CTI, contrat n° 14220.1 PFNM-NM)

Merci à mes collaborateurs Dr. Sami Karkar et Etienne Rivet (EPFL), ainsi qu'aux partenaires du projet:

h e p i a

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



- **HEPIA** : Prof. Antoine Pittet et David Strobino
- **Goldmund SA**: Dr. Véronique Adam, Torje Thorse et Quentin Berthet
- **PSI Audio SA**: Alain Roux, Christian Martin, Roger Roschnik

MERCI DE VOTRE ATTENTION



8 et 9 JUIN 2015

Paris - Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA

