

Etude vibroacoustique et perceptive du bruit rayonné à l'intérieur d'une voiture de train

Emmanuelle Guibert

Bourse BDI CNRS-SNCF

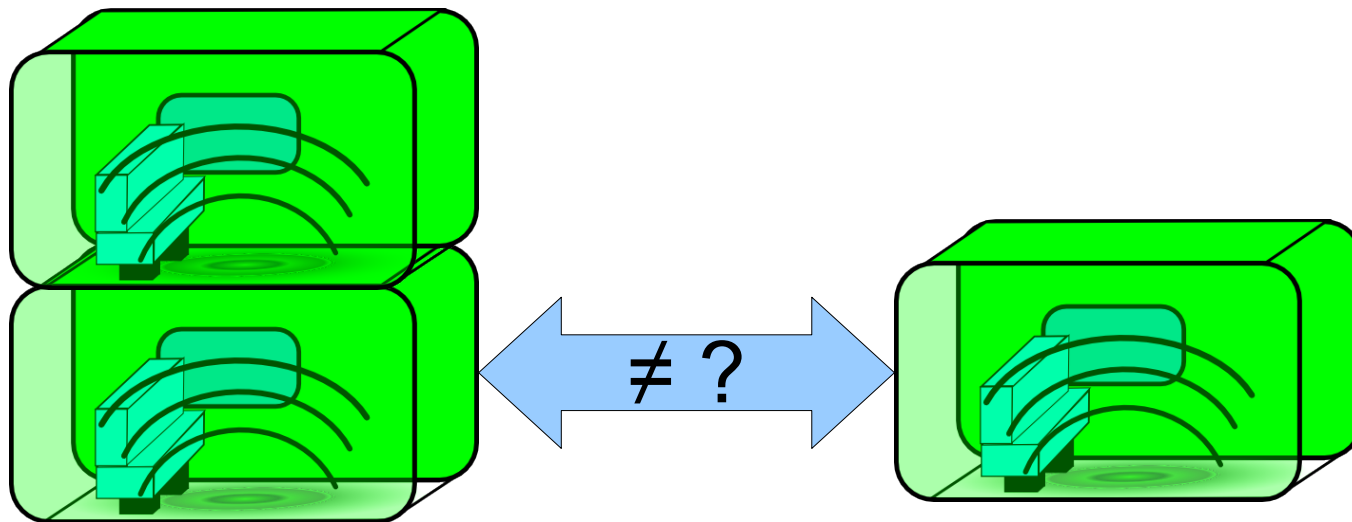
Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, CNRS
Direction de l'Innovation et de la Recherche, SNCF

Encadrement : D. Habault (LMA),
P.E. Gautier (SNCF), F. Poisson (SNCF)



Objectifs et introduction

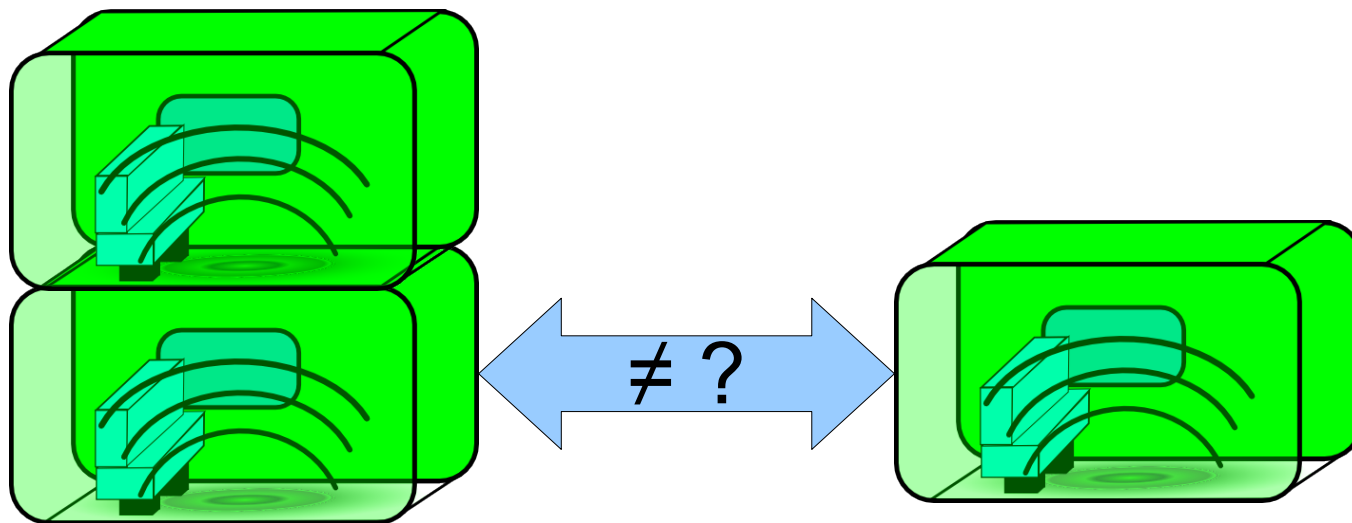
Quelle est l'influence de la modification des paramètres d'une structure sur le rayonnement et la perception ?



Objectifs et introduction

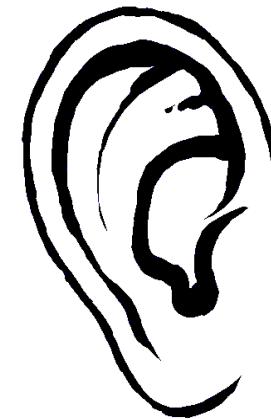
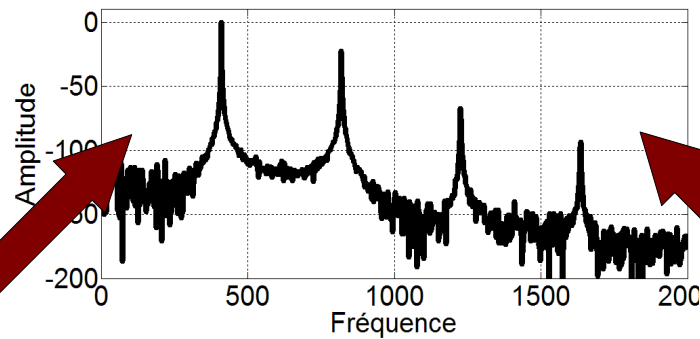
Quelle est l'influence de la modification des paramètres d'une structure sur le rayonnement et la perception ?

→ psychomécanique



Objectifs et introduction

Etude de psychomécanique



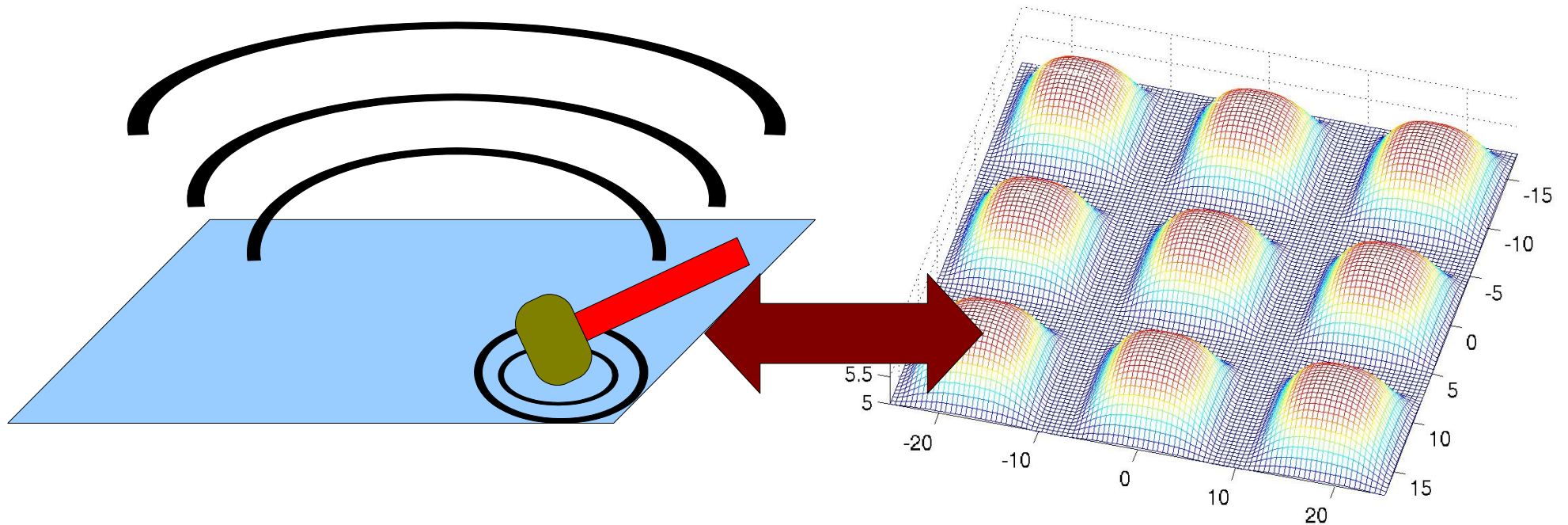
Vibroacoustique

Psychoacoustique

Objectifs et introduction

- Etude psychomécanique de la plaque vibrante

Equivalence perceptive entre une plaque d'épaisseur constante et une plaque d'épaisseur non constante *



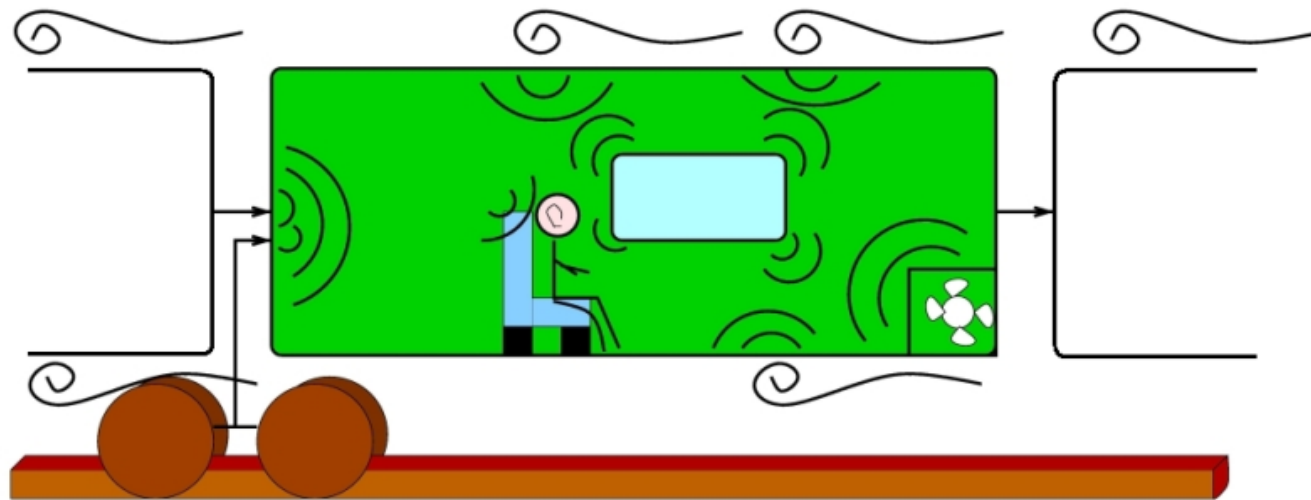
*F. Demirdjian, Psychomécanique des sons transitoires rayonnés par des plaques, Thèse de doctorat, Université de la Méditerranée, 2006

Objectifs industriels

- Recherche des paramètres physiques les plus influents sur la perception
 - Architecture de voiture de train
 - Position des sources vibratoires
 - Revêtement
- Basses fréquences [20-200]Hz
- Simplification de la modélisation selon des critères perceptifs

Objectifs industriels

- Bruit à l'intérieur d'une voiture de TGV
 - i. Bruit « voyageurs » *
 - ii. Bruit propre à la voiture (sources multiples)



*M. Mzali, Perception de l'ambiance sonore et évaluation du confort acoustique dans les trains, Thèse de doctorat, Université Paris 6, 2002

Plan de la présentation

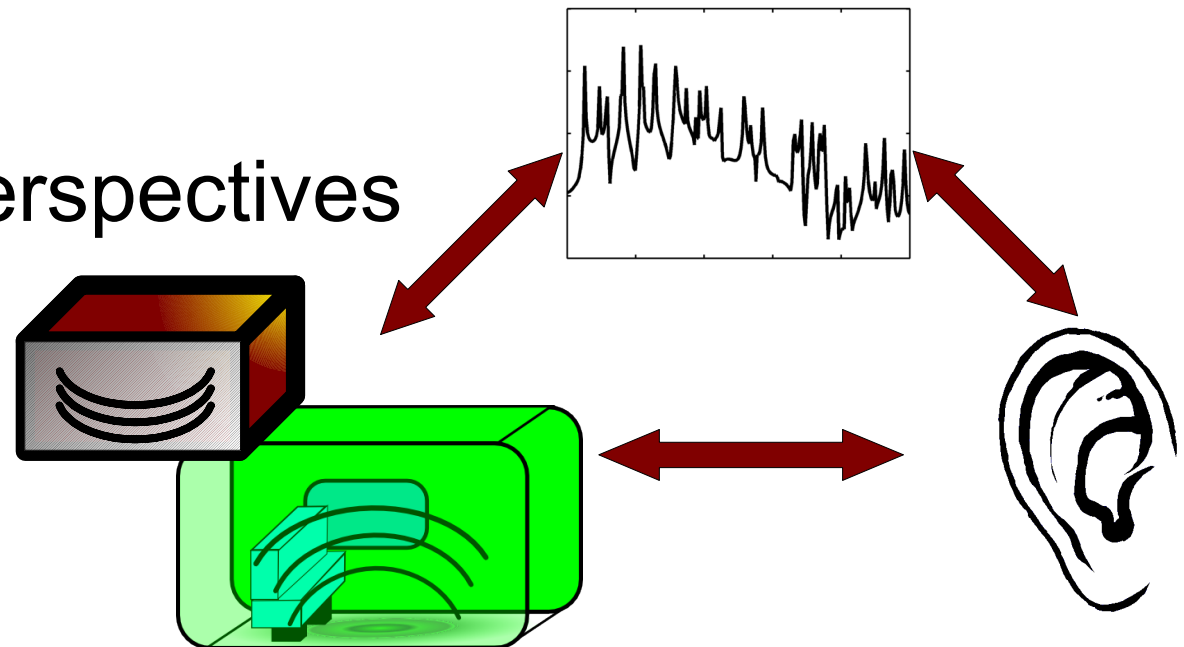
1. Système plaque/cavité

- Modélisation et expérimentations vibroacoustiques
- Tests perceptifs

2. Train à Grande Vitesse

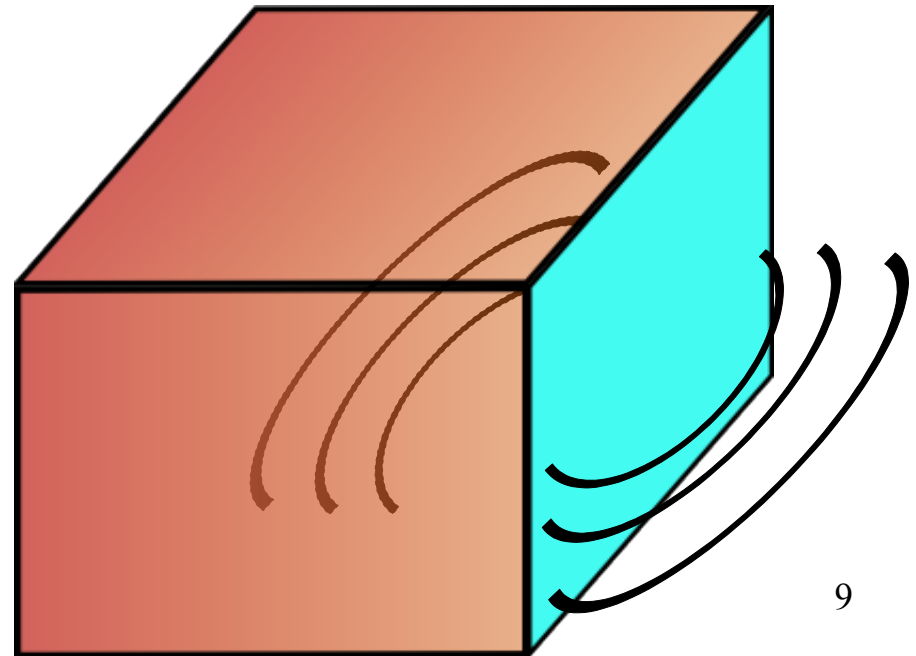
- Outil : analyse modale opérationnelle
- Test perceptif

3. Conclusions et perspectives



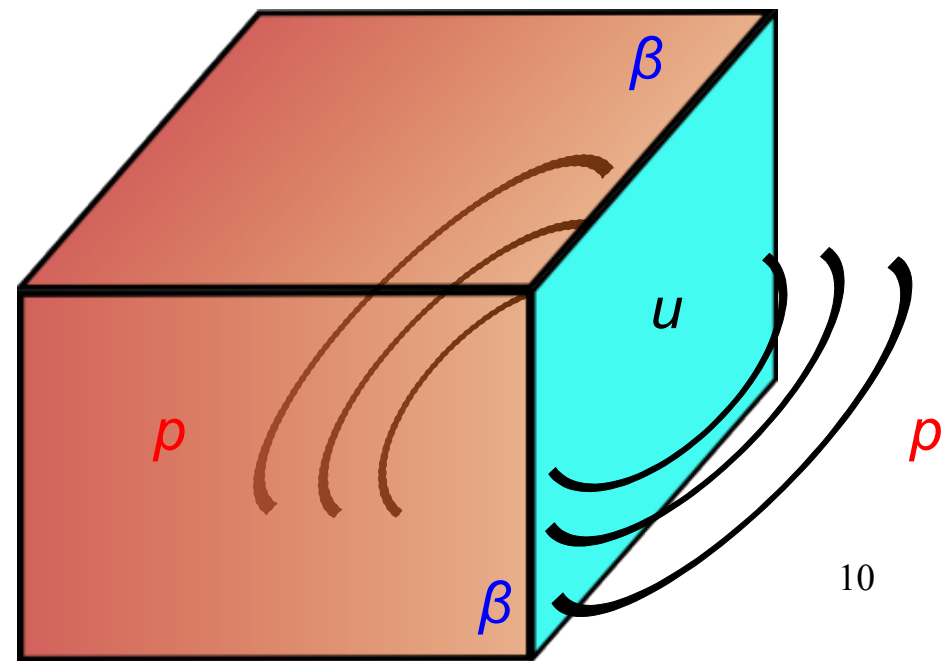
1. Le système plaque/cavité

- Modélisation vibroacoustique :
 - Calcul de la pression à l'intérieur de la cavité
 - Comparaison avec l'expérience
- Tests perceptifs :
 - Signaux de synthèse
 - Signaux enregistrés



1. Le système plaque/cavité : Modélisation

- Résolution fréquentielle
- Problème couplé : structure (u) et pression (p)
- Série de modes de résonance pour u
- Fonction de Green de la cavité par méthode d'images $\mathbf{G} = \Sigma \beta.g$
- Coefficient de réflexion β ($0 < \beta < 1$) des parois
- Synthèse temporelle par FFT inverse



1. Le système plaque/cavité : Modélisation

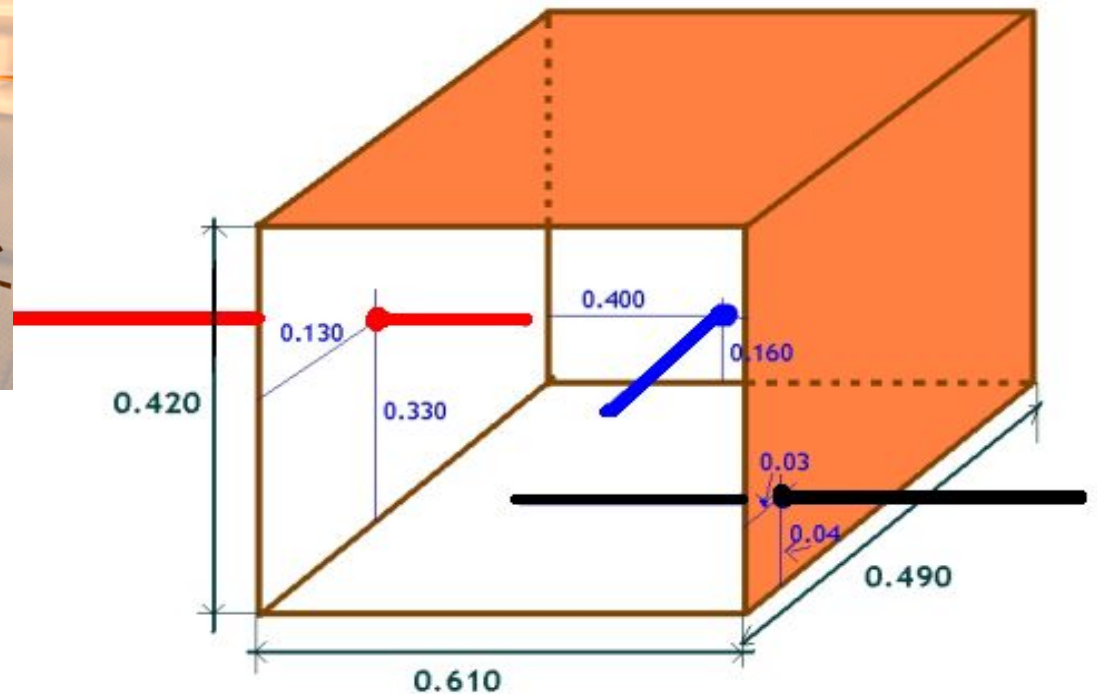
Quelques résultats intéressants :

Fréquence de la plaque	Premier mode	Deuxième mode	Troisième mode	Quatrième mode
<i>In vacuo</i>	93,49 Hz	147,67 Hz	226,68 Hz	238,52 Hz
Dans l'air <i>variation de la fréquence modale par rapport au cas in vacuo</i>	90,48 Hz -3,2%	145,06 Hz -1,8%	223,33 Hz -1,5%	235,62 Hz -1,2%
Couplée avec la cavité <i>variation de la fréquence modale par rapport au cas in vacuo</i>	96,50 Hz +3,2%	145,39 Hz -0.2%	223,36 Hz -1,5%	235,33 Hz -1,4%
<i>variation de la fréquence modale par rapport au cas dans l'air</i>	+6,6%	+0,2%	+0,01%	-0,1%

1. Le système plaque/cavité :

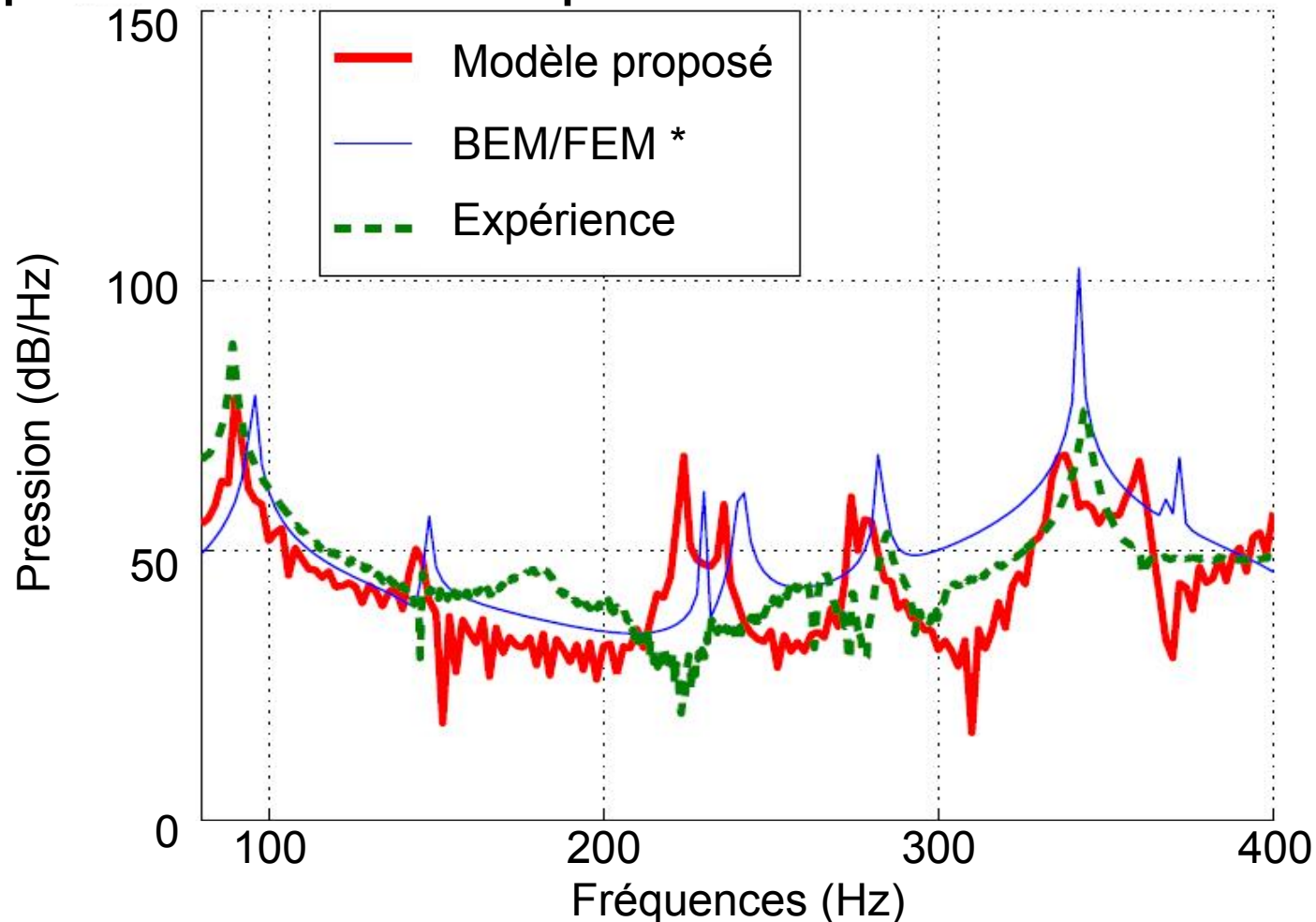
Comparaison

- Comparaison avec l'expérience :



1. Le système plaque/cavité : Comparaison

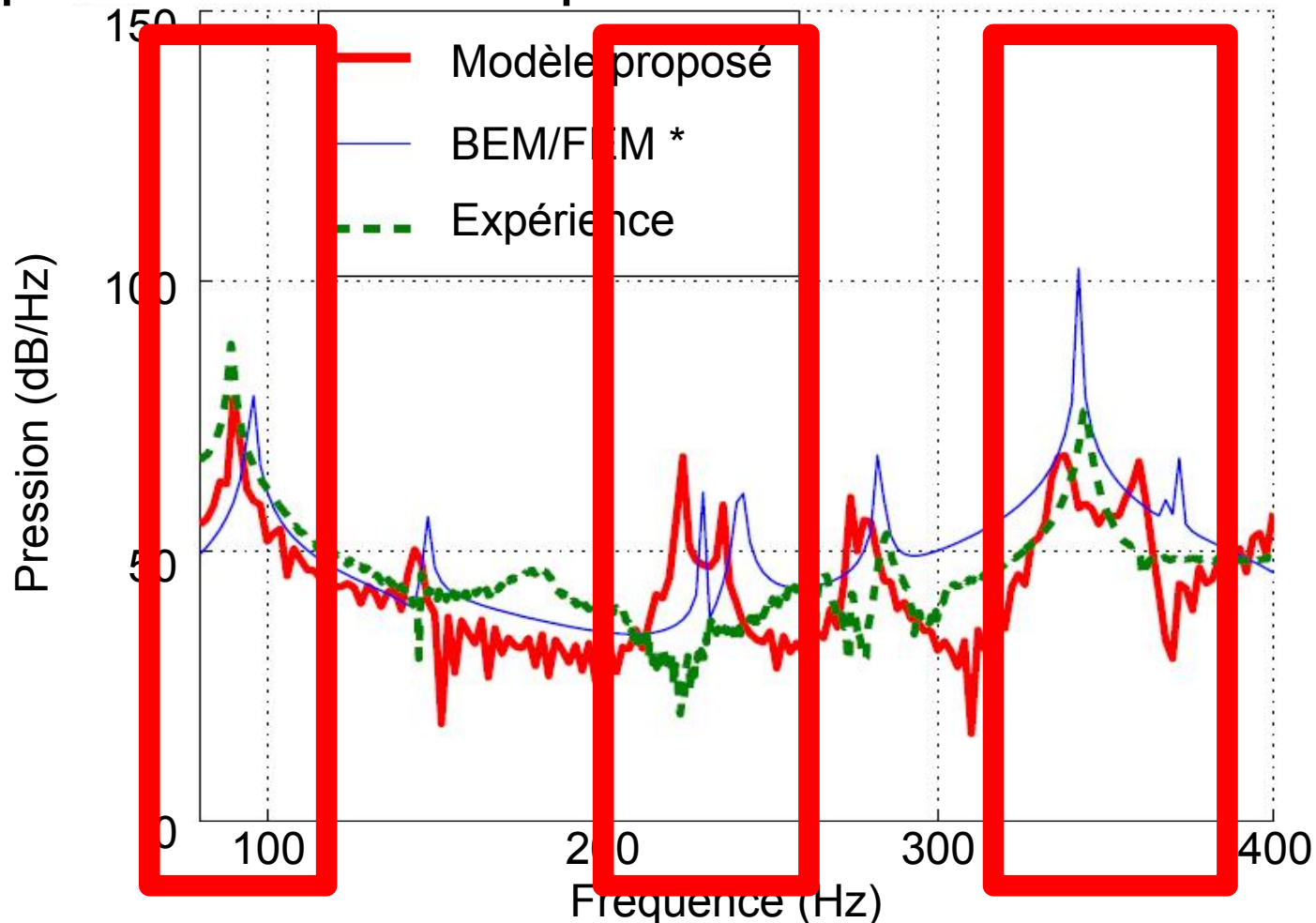
- Comparaison avec l'expérience et méthode BEM/FEM



*S. Schneider, Numerische Simulation von Fluid-Struktur-Kopplung mittels FE-BE kopplung unter Verwendung schneller Randelemente-Verfahren, LMA, Universite de Dresde, 2007¹³

1. Le système plaque/cavité : Comparaison

- Comparaison avec l'expérience et méthode BEM/FEM

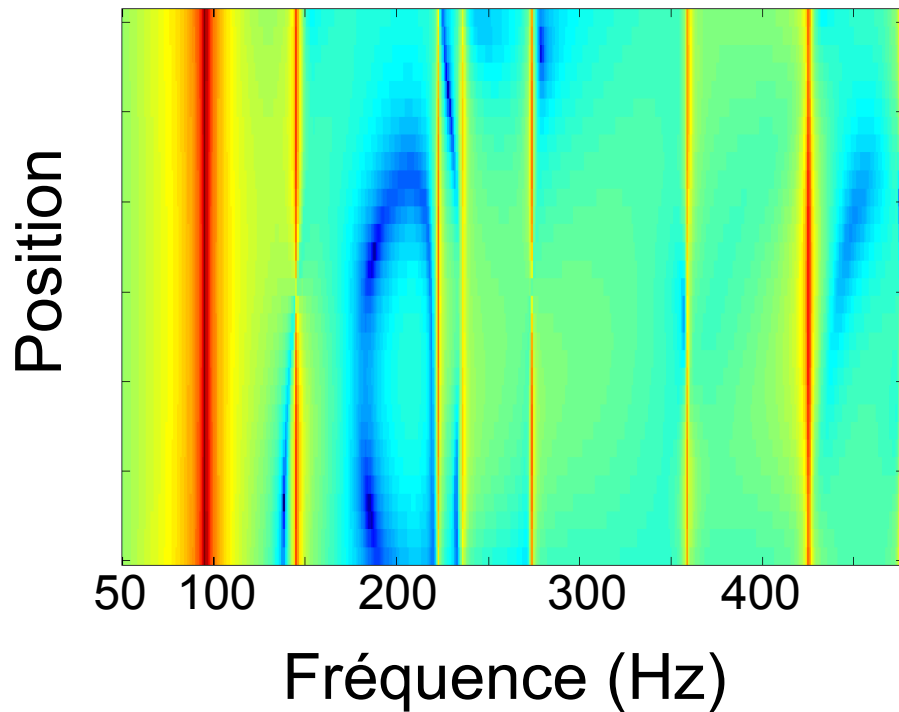


1. Le système plaque/cavité : Comparaison

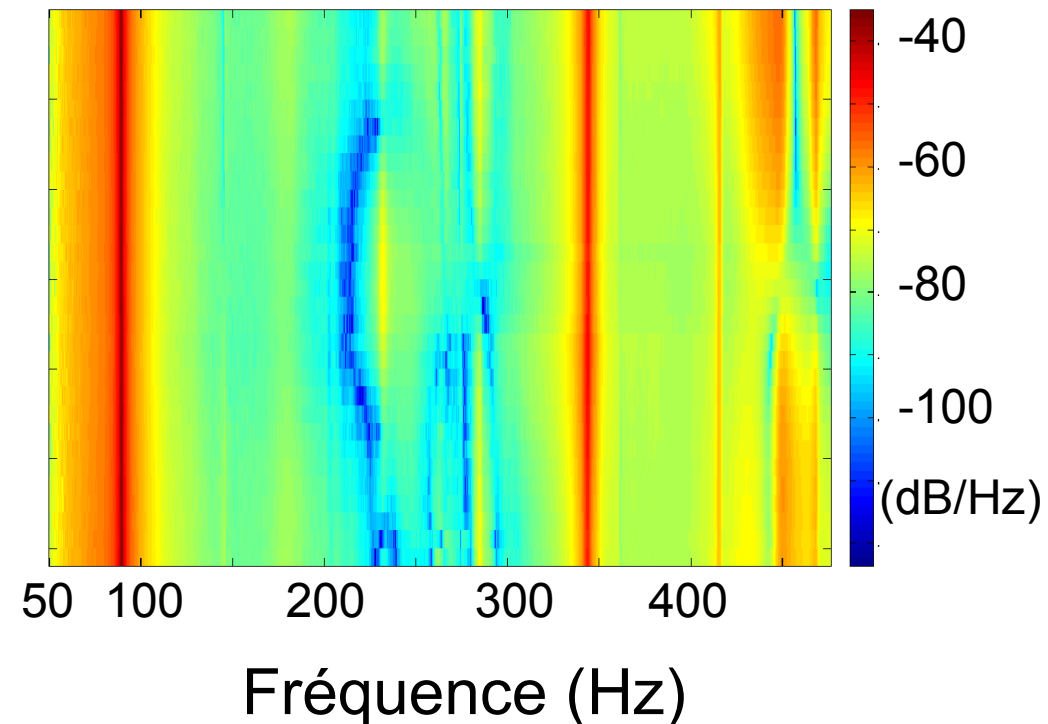
- Comparaison avec l'expérience :

Pression sur un axe parallèle à la plaque

Pression calculée



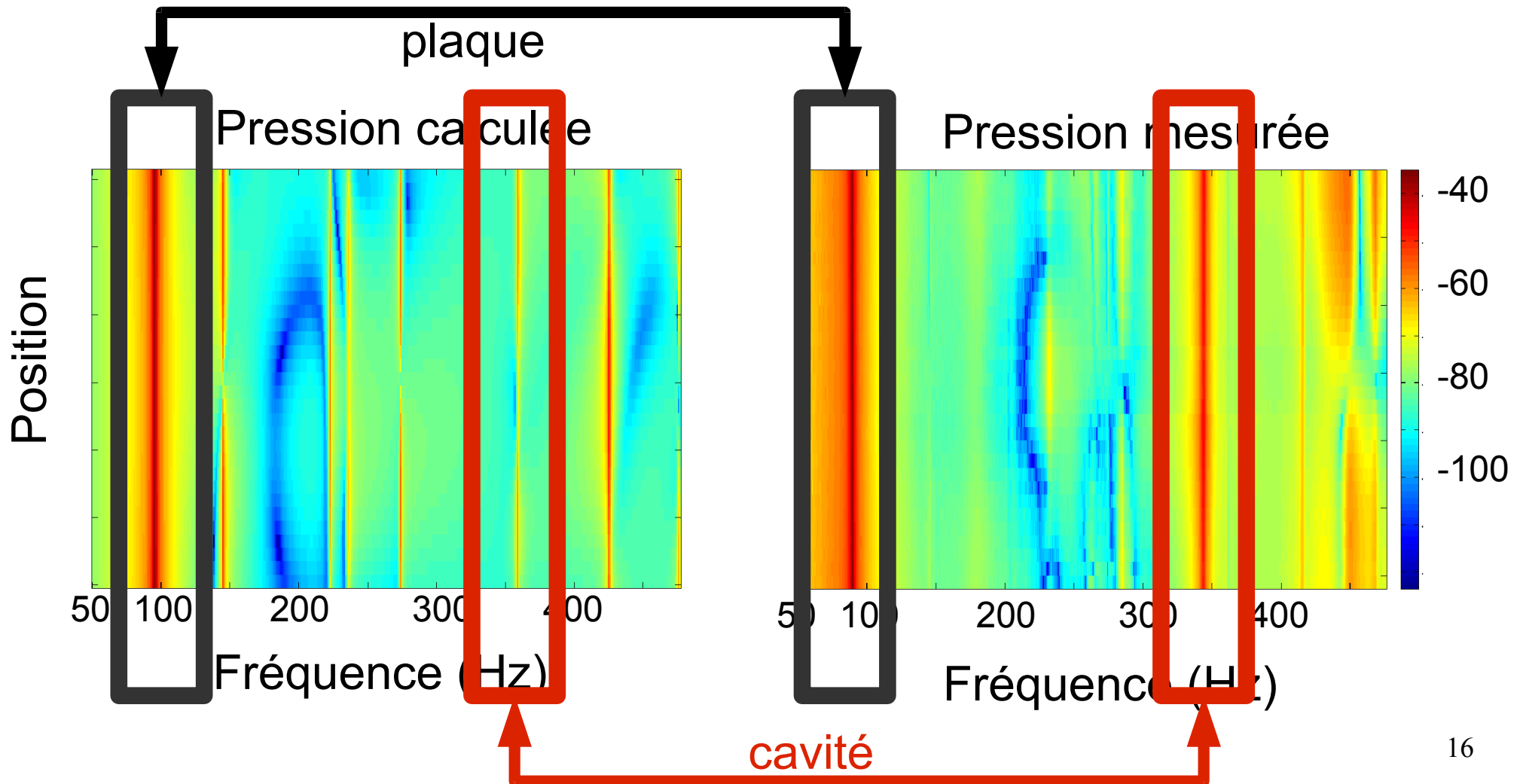
Pression mesurée



1. Le système plaque/cavité :

Comparaison

- Comparaison avec l'expérience :



1. Le système plaque/cavité : Tests perceptifs

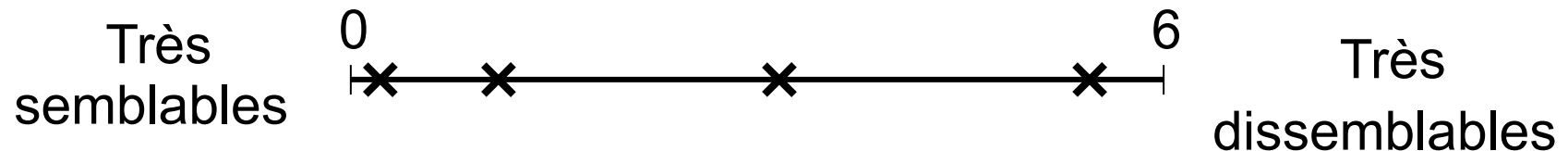
- Deux tests perceptifs de dissemblance
 - Outil : test de dissemblance
 - Test 1 : signaux de synthèse, excitation = impact
 - Test 2 : signaux enregistrés, excitation = bruit blanc

1. Le système plaque/cavité :

Tests perceptifs

- Test de dissemblance :
 - Ensemble de signaux rayonnés par une structure
 - Plusieurs paramètres varient
 - Présentation des signaux par paires
 - Jugements d'auditeurs sur la dissemblance entre des signaux

– Interface utilisateur :

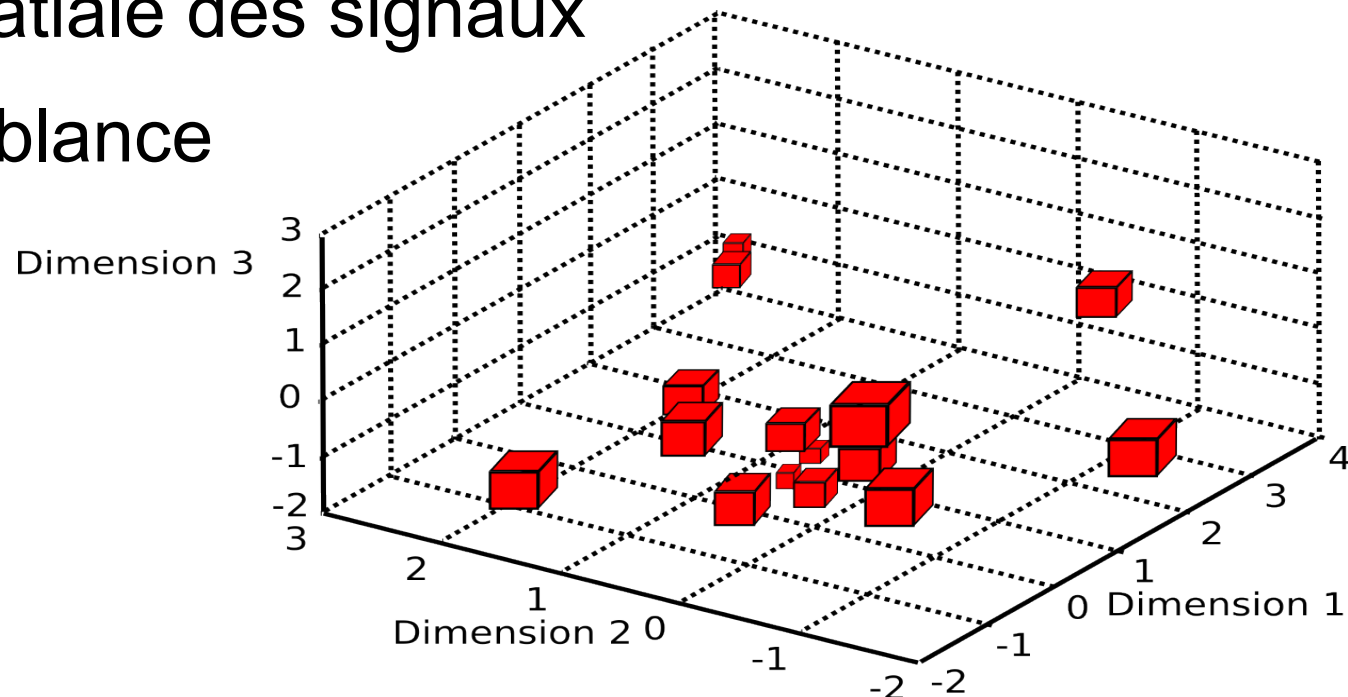


– Signaux égalisés en sonie

1. Le système plaque/cavité : Tests perceptifs

→ Espace perceptif

- **MultiDimensional Scaling (MDS)**
- Représentation spatiale des signaux
- Distance = dissemblance



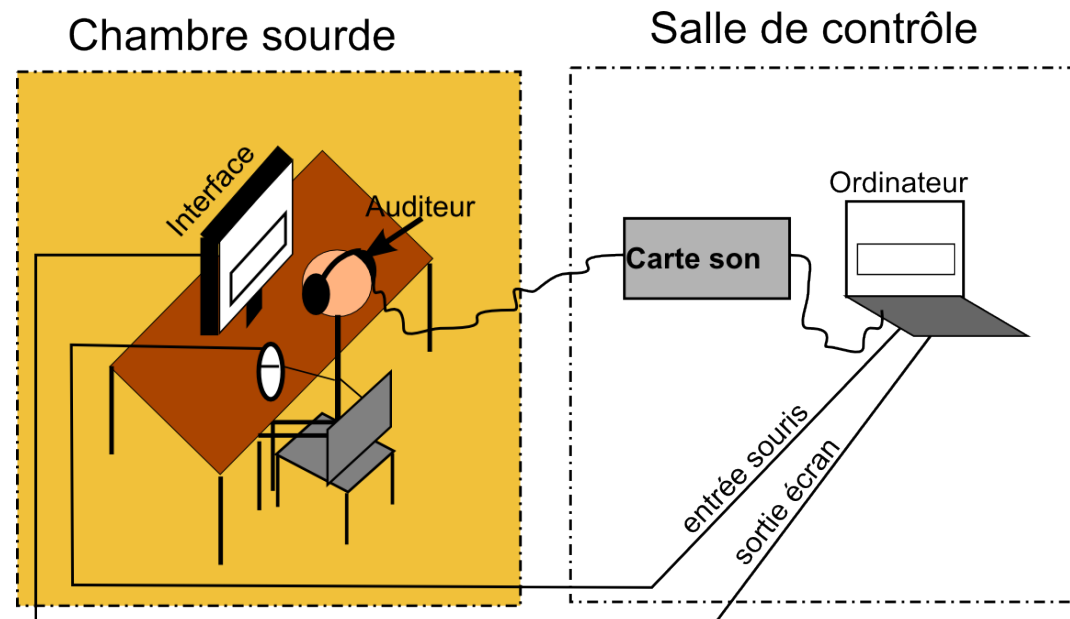
→ Position relative des signaux dans l'espace ?

→ Quelle est la signification de chaque dimension ?

1. Le système plaque/cavité : Test perceptif 1

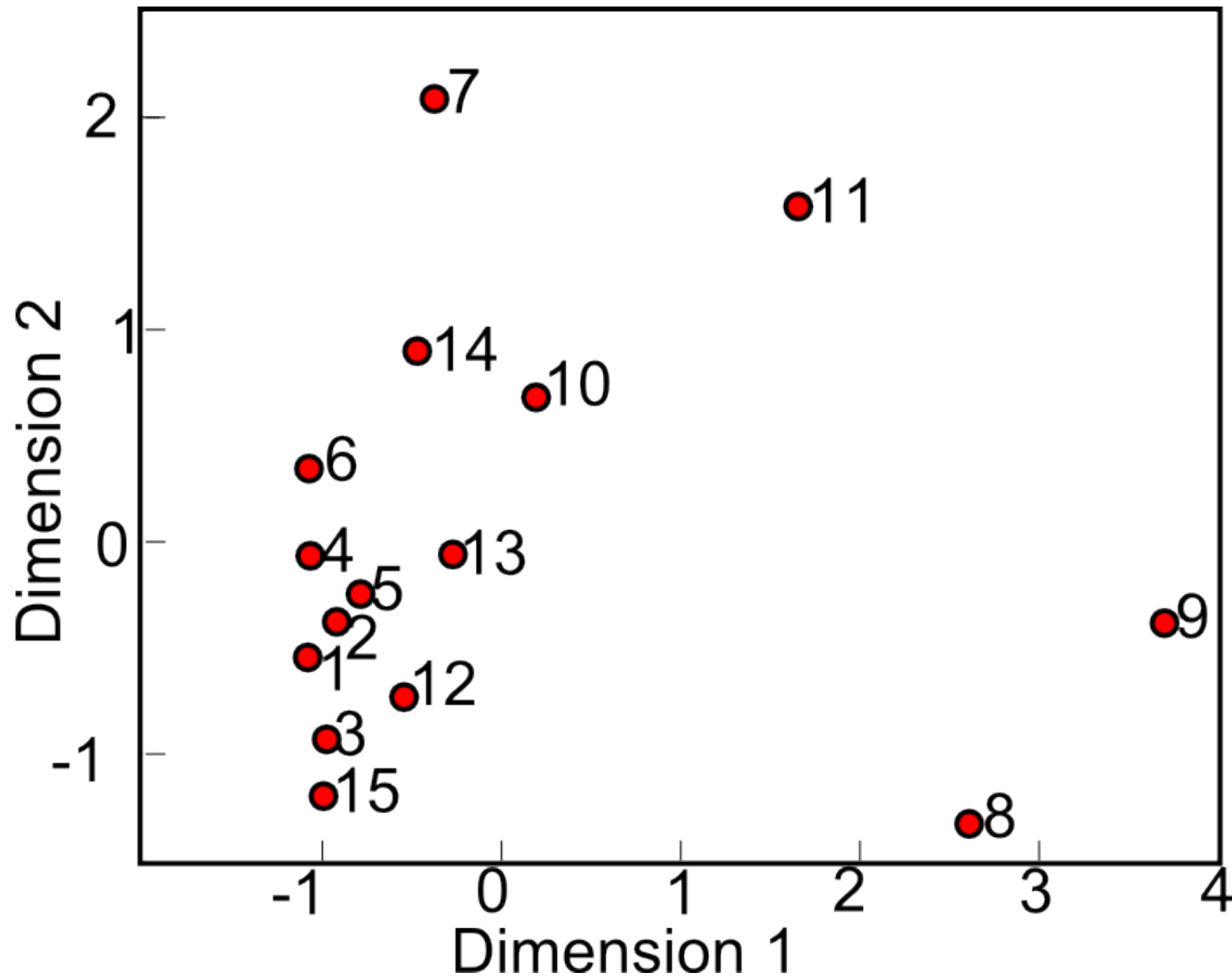
- Test 1 : signaux de synthèse 0-1500 Hz, impact,
 - paramètre numérique (nombre N d'images, $\mathbf{G} = \sum^N \beta \cdot g$),
 - coefficient de réflexion $0 < \beta < 1$ (id. sur toutes parois),
 - point d'impact et point d'écoute = nombre de modes excités

- 15 signaux
- 15 auditeurs

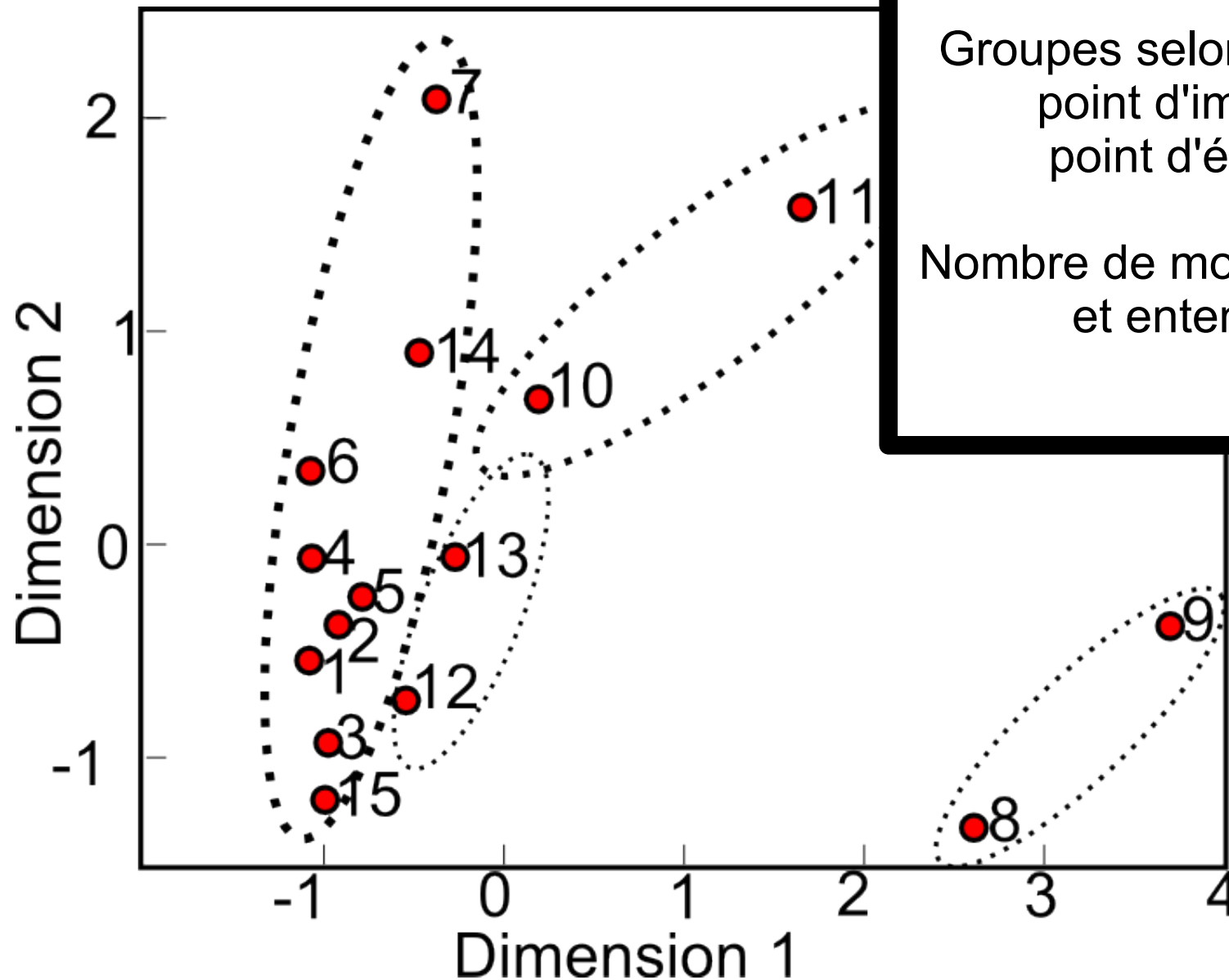


- MDS : espace perceptif à 3 dimensions

1. Le système plaque/cavité : Test perceptif 1



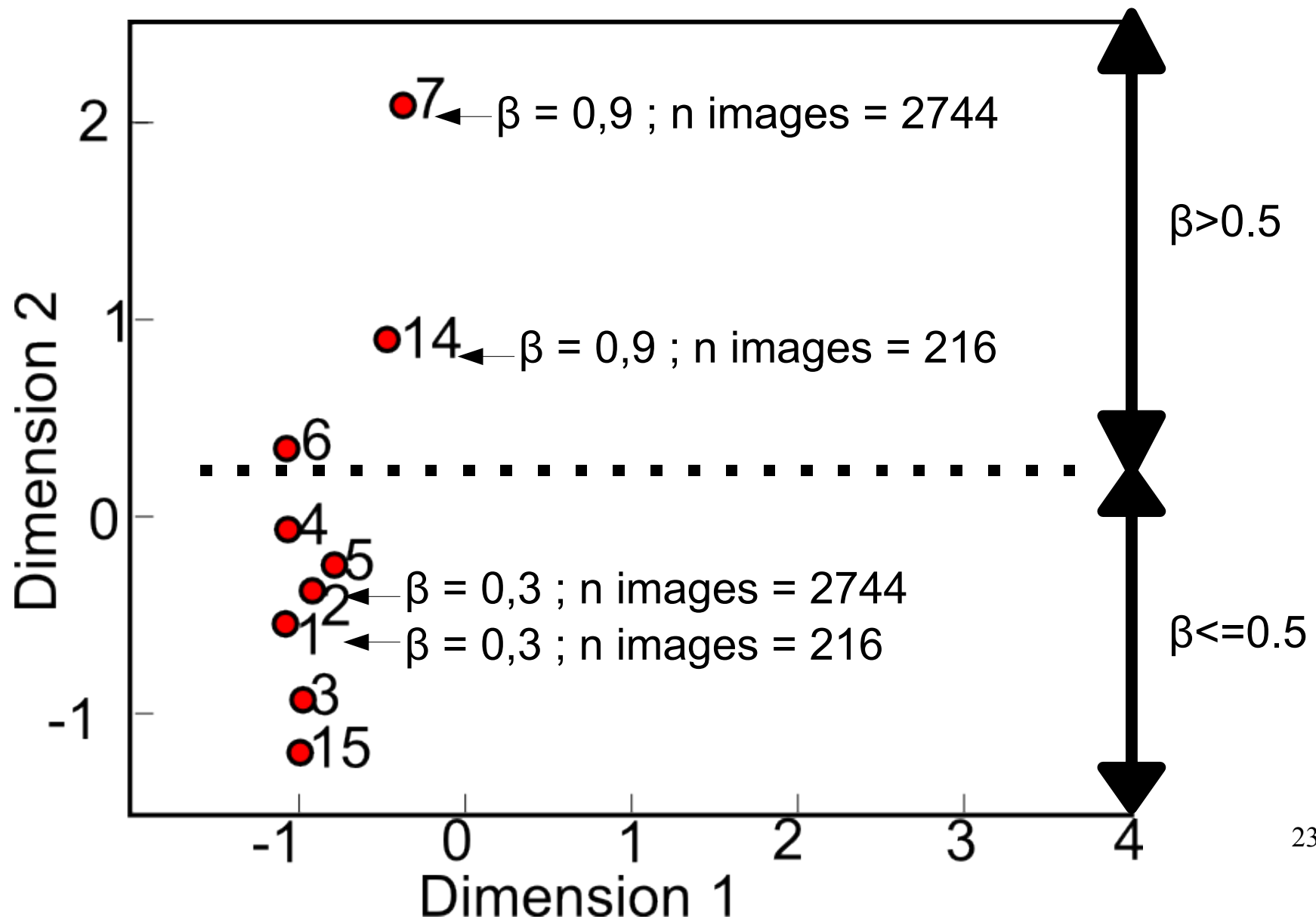
1. Le système plaque/cavité : Test perceptif 1



Groupes selon le couple
point d'impact /
point d'écoute

Nombre de modes excités
et entendus

1. Le système plaque/cavité : Test perceptif 1

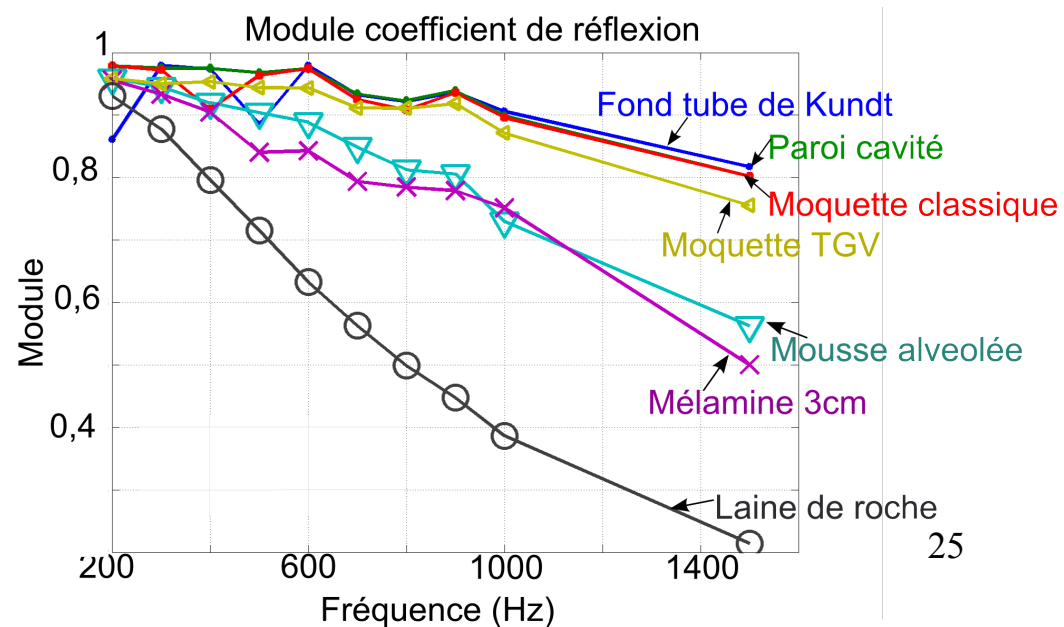
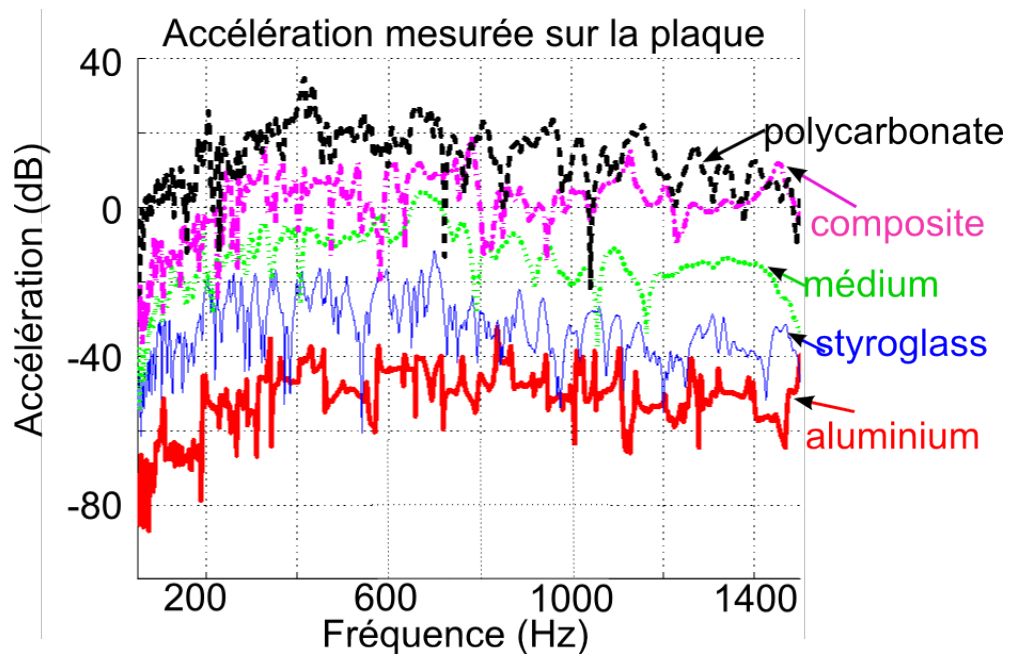


1. Le système plaque/cavité : conclusions test perceptif 1

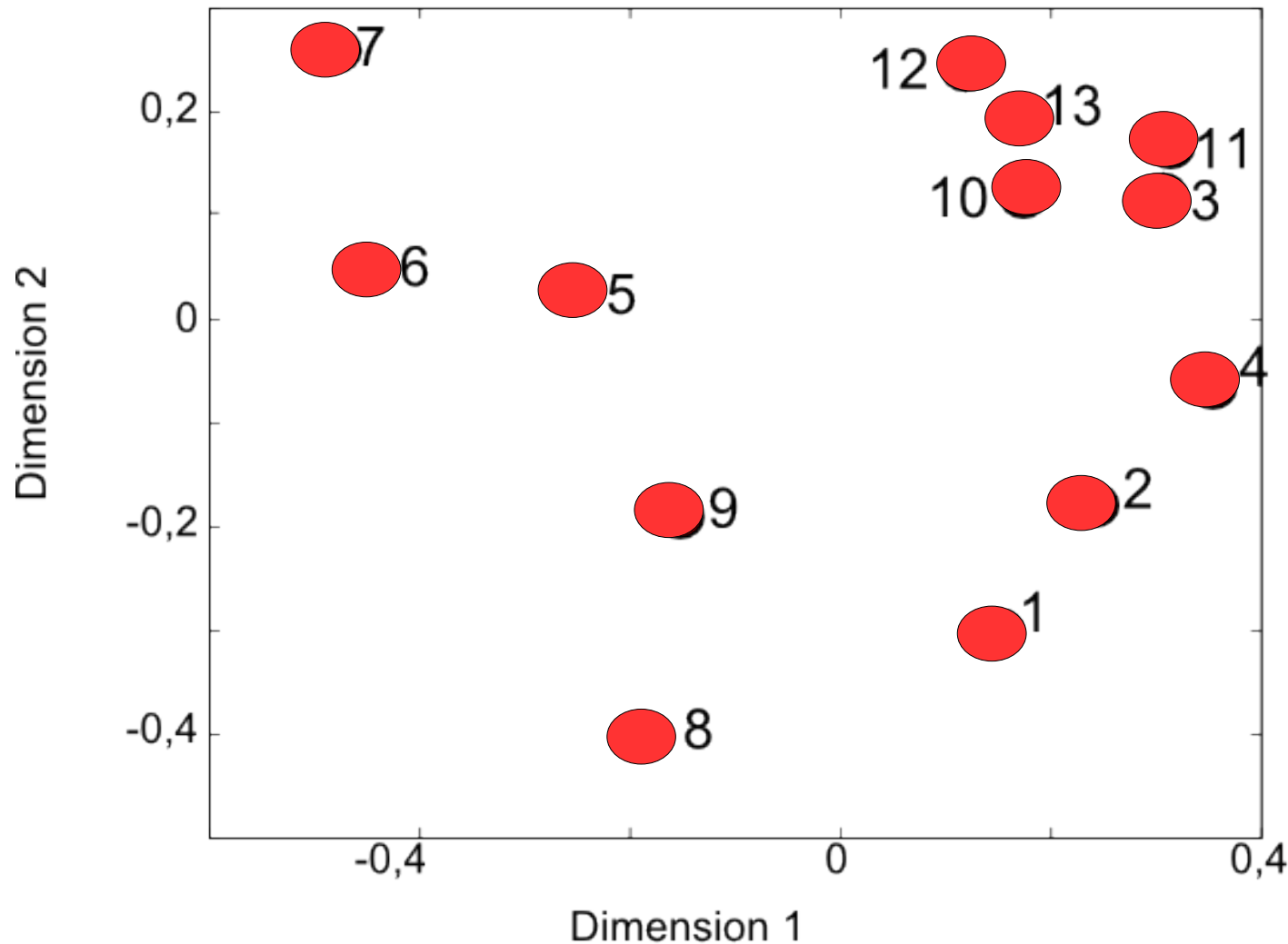
- Outil pour connaître l'influence perceptive
 - du nombre d'images dans la modélisation
 - de la précision numérique
 - de la position de la source

1. Le système plaque/cavité : Test perceptif 2

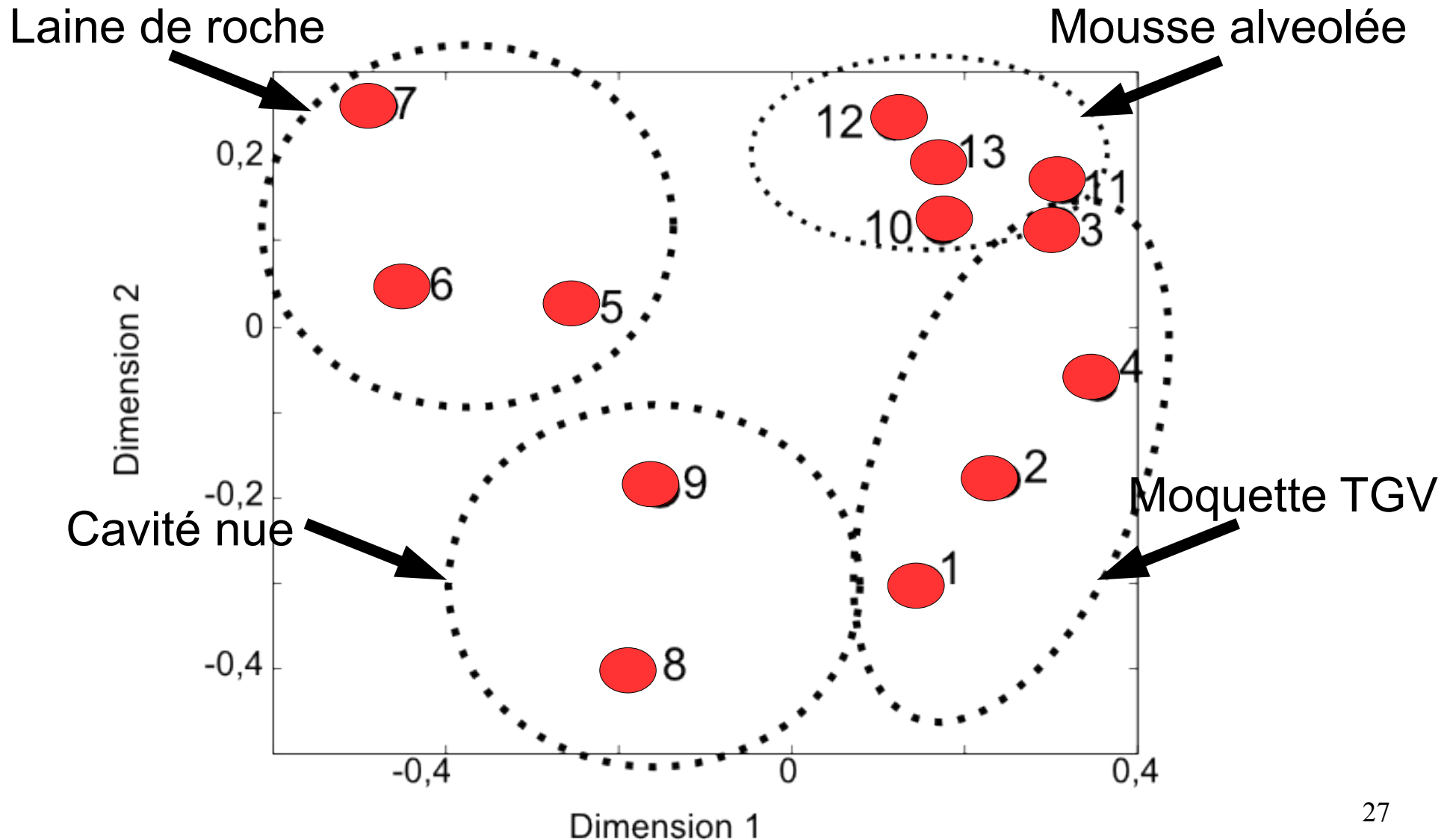
- Test 2 : signaux expérimentaux, excitation = bruit blanc,
 - Type de plaque : aluminium, composite, polycarbonate, médium
 - Type de revêtement : aucun, moquette TGV, laine roche, mousse alveolée
 - Position revêtement : une paroi, deux parois face à face, toute la cavité



1. Le système plaque/cavité : Test perceptif 2

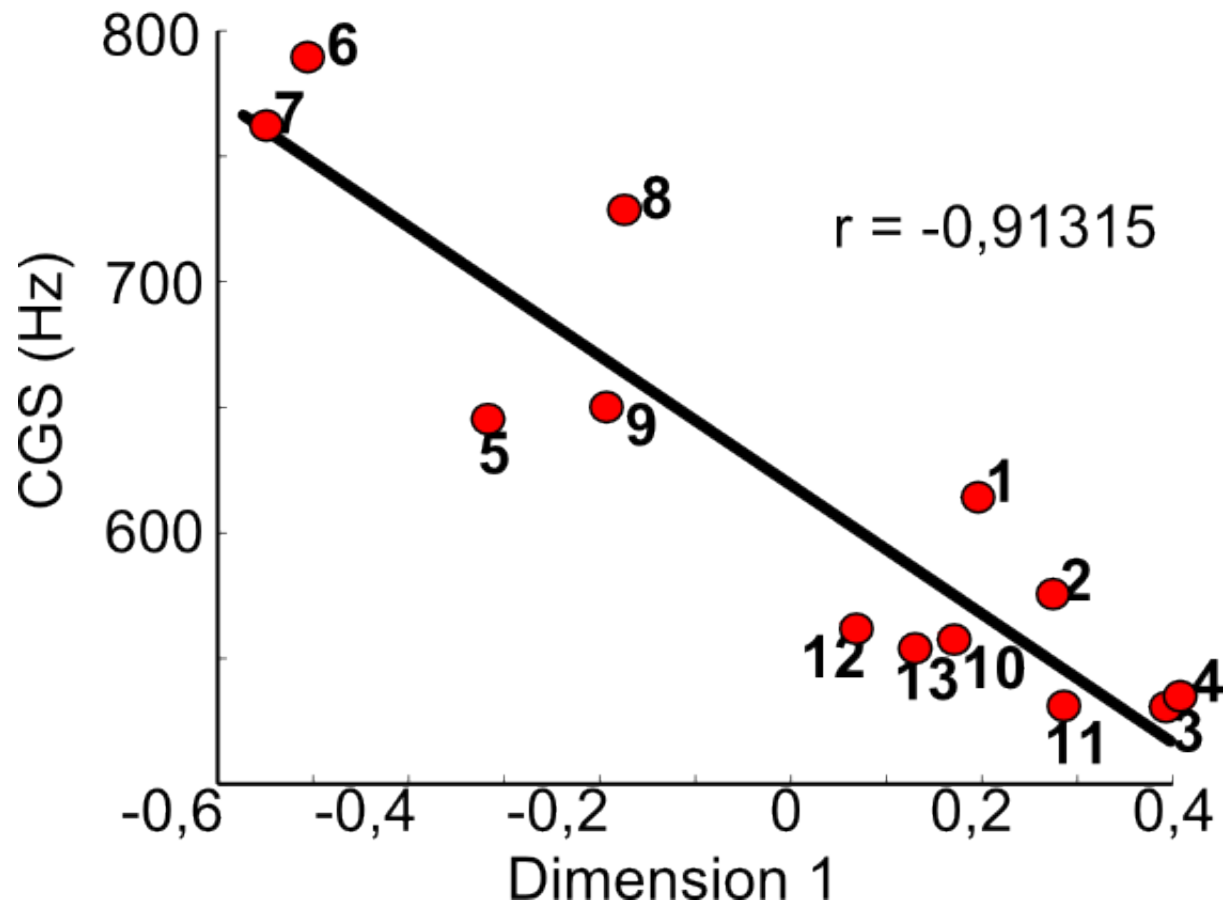


1. Le système plaque/cavité : Test perceptif 2



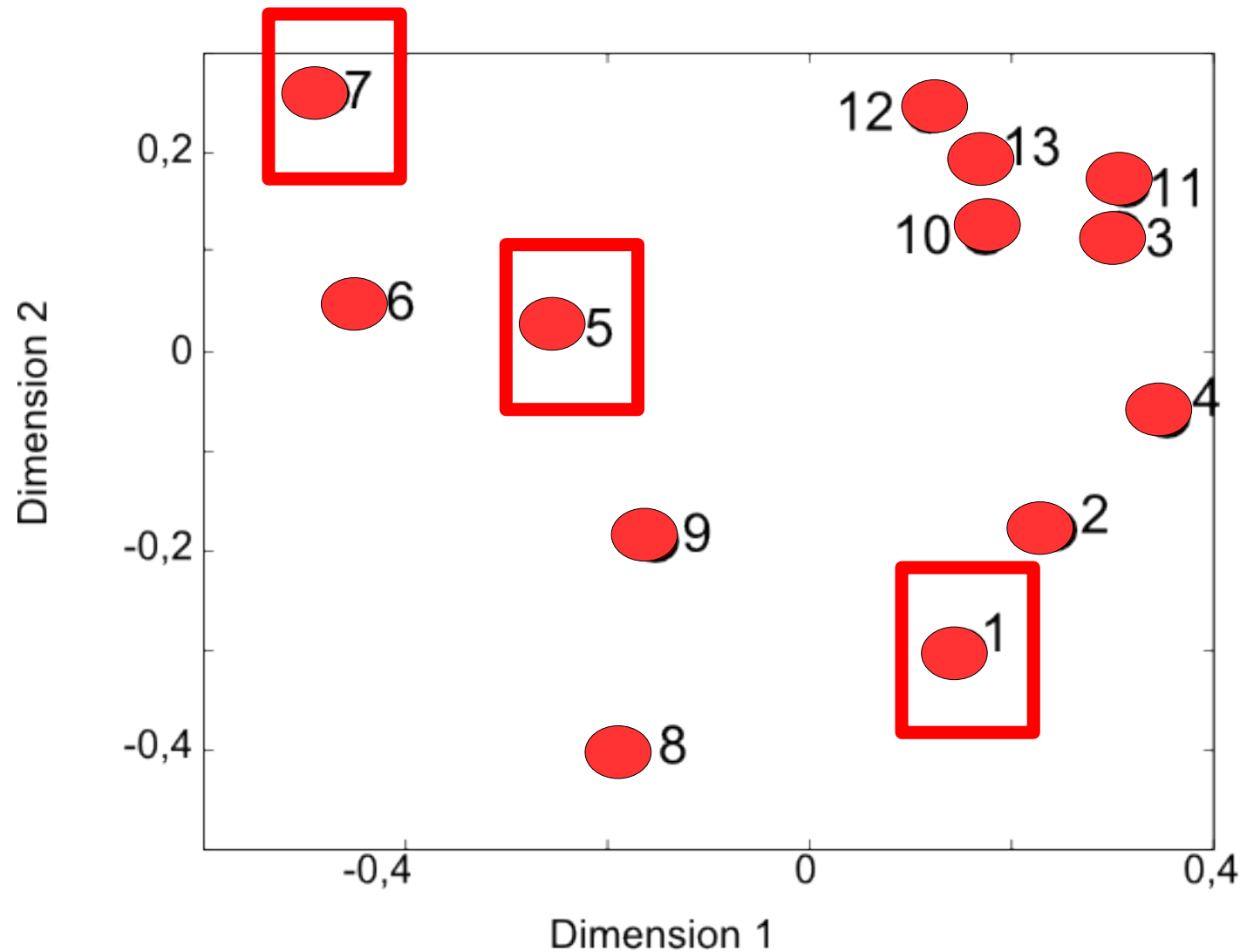
1. Le système plaque/cavité : Test perceptif 2

- Dimension 1 : brillance



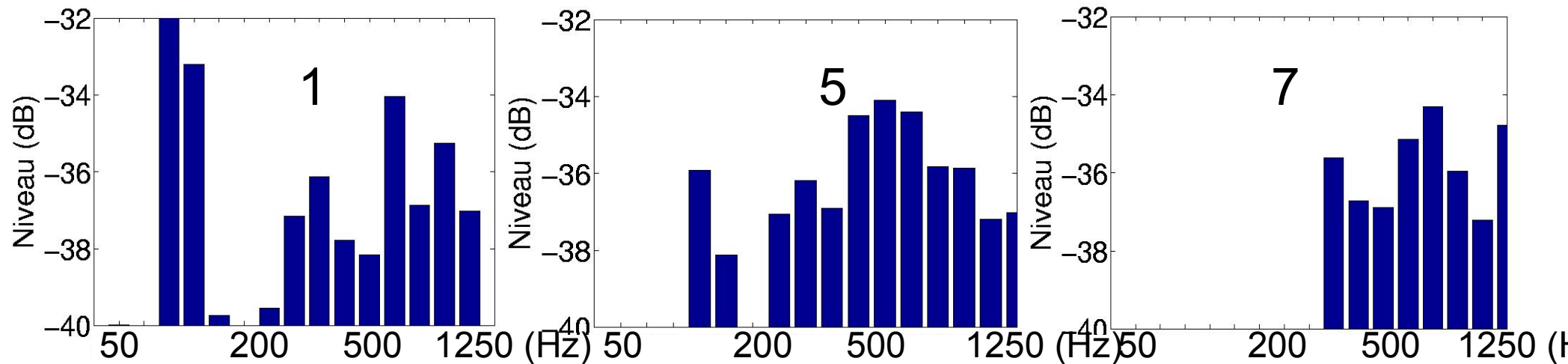
1. Le système plaque/cavité : Test perceptif 2

- Dimension 2 : balance spectrale



1. Le système plaque/cavité : Test perceptif 2

- Dimension 2 : balance spectrale



R = 0,75

R = 1,42

R = 2,18

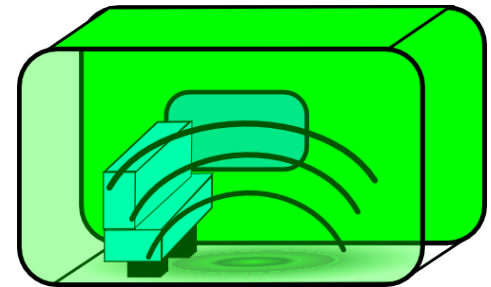
R = Niveau HF / Niveau BF

1. Le système plaque/cavité : Conclusions test perceptif 2

- Amortissement des parois
- Matériau plaque
- Position du revêtement ?

2. Le Train à Grande Vitesse

- Modélisation vibroacoustique
 - analyse modale opérationnelle (AMO)
 - théorie
 - essais sur structure virtuelle et sur le système plaque/cavité
 - enregistrements à l'intérieur d'un TGV
- Tests perceptifs
 - signaux enregistrés
 - *signaux synthétisés*



2. Le Train à Grande Vitesse : Analyse Modale Opérationnelle

- Pourquoi une analyse modale opérationnelle ?
 - Système encombrant
 - Sans connaissance a priori des sources
 - Modes seulement excités en condition de roulement
 - **Identification des modes pour une session de mesure pour modélisation et synthèse sonore**

2. Le Train à Grande Vitesse : Analyse Modale Opérationnelle

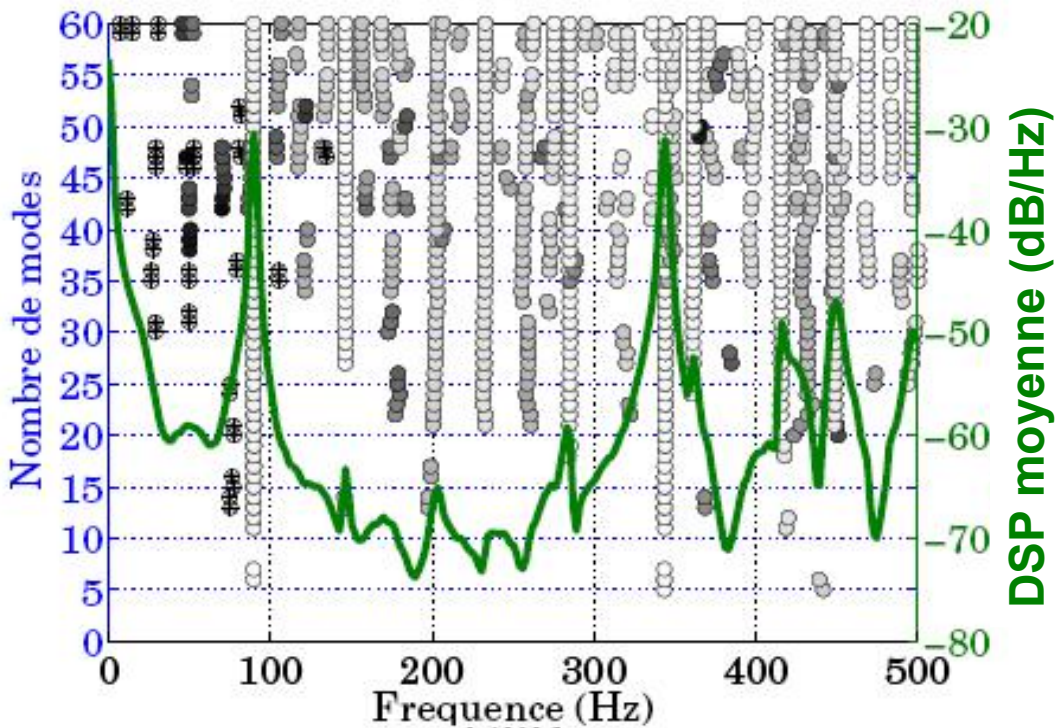
- Les méthodes utilisées
 - Least Square Complex Exponential (LSCE)
 - Auto Régressif (AR)
 - Stochastic Subspace Identification (SSI)
- Itération sur l'ordre du modèle
 - Nombre n de modes choisi en entrée
 - Trouver le modèle modal à n modes qui correspond au mieux aux signaux analysés
- Diagramme de stabilisation
 - Identifier un mode apparaissant pour plusieurs n

2. Le Train à Grande Vitesse : Analyse Modale Opérationnelle

- Validation sur modèle numérique *
 - Simulation de signaux à partir d'une représentation d'état
 - Analyse des algorithmes
 - Rôle et choix des valeurs des paramètres d'entrée
- Validation sur des signaux expérimentaux plaque/cavité
 - Signaux de pression et d'accélération

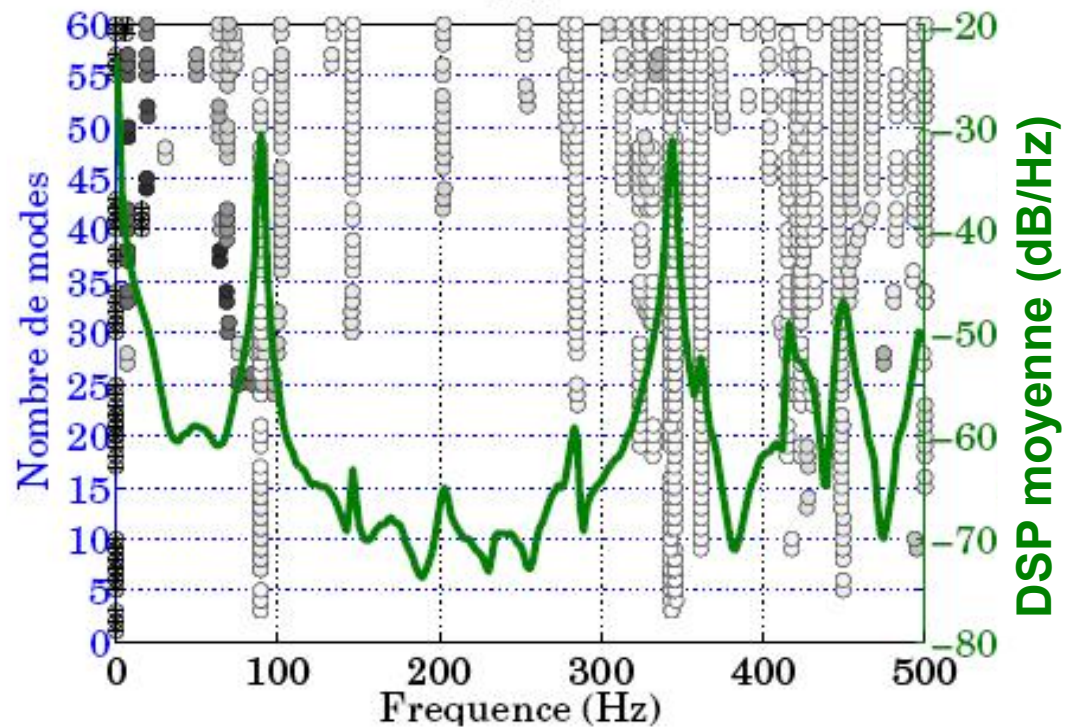
* A. Merer, rapport de stage de master 1ere année, Université de la Méditerranée, 2006

LSCE

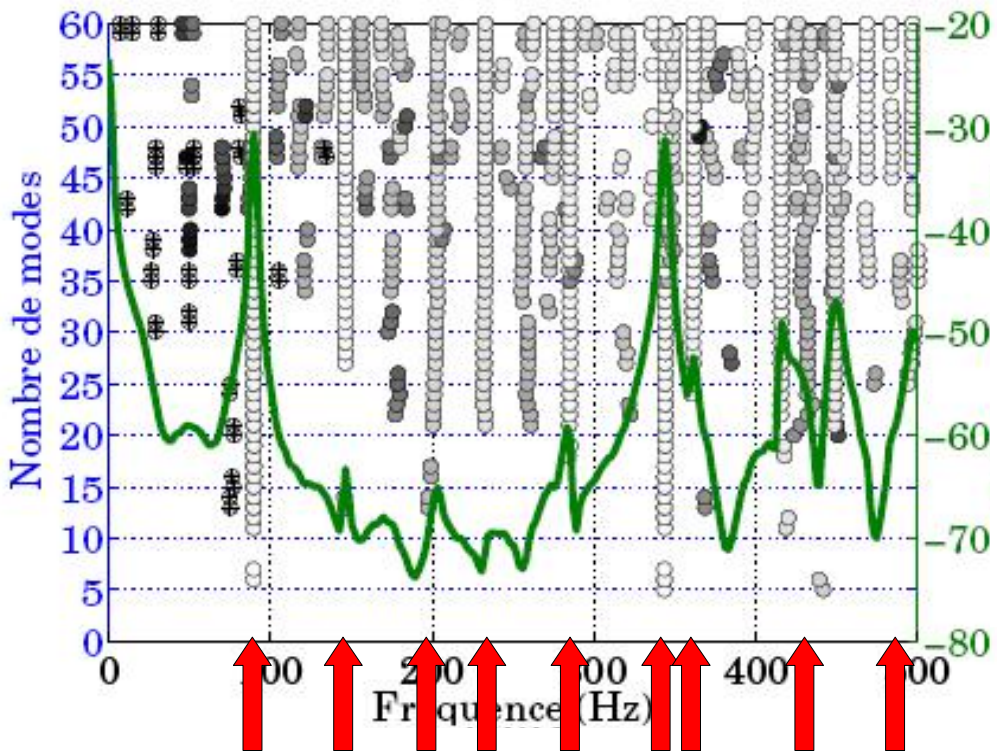


Signal d'accélération
sur la plaque

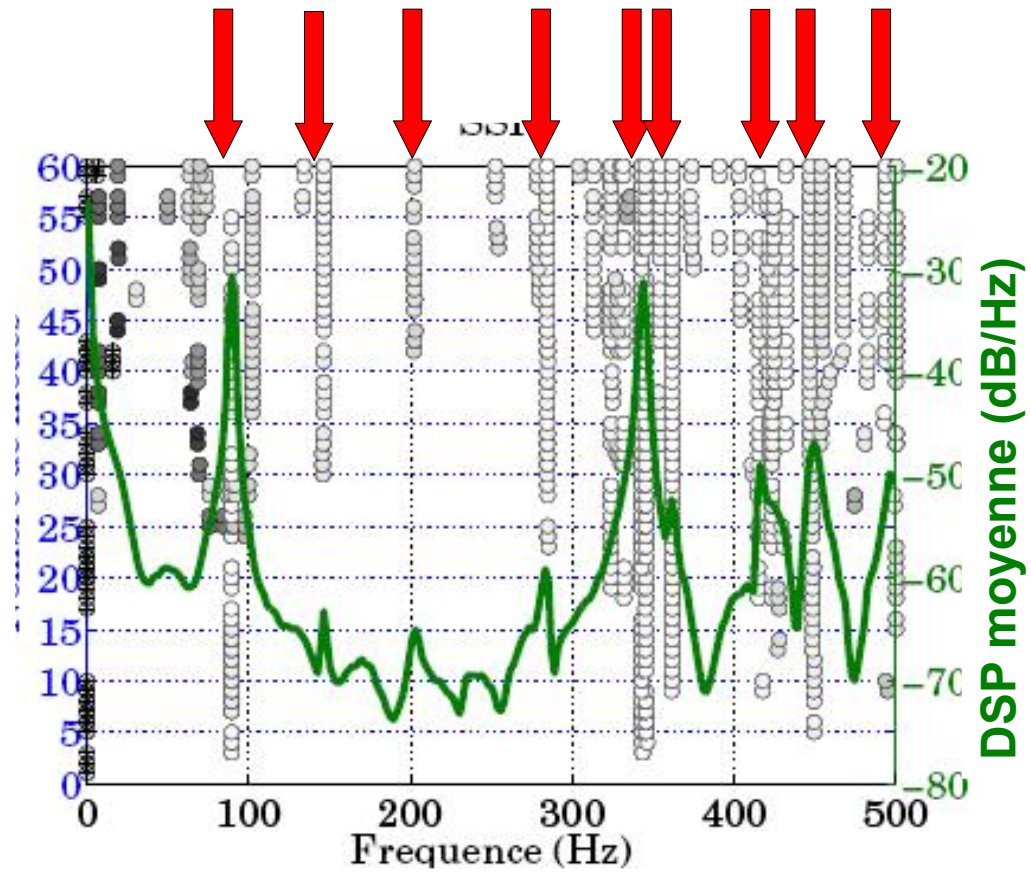
SSI

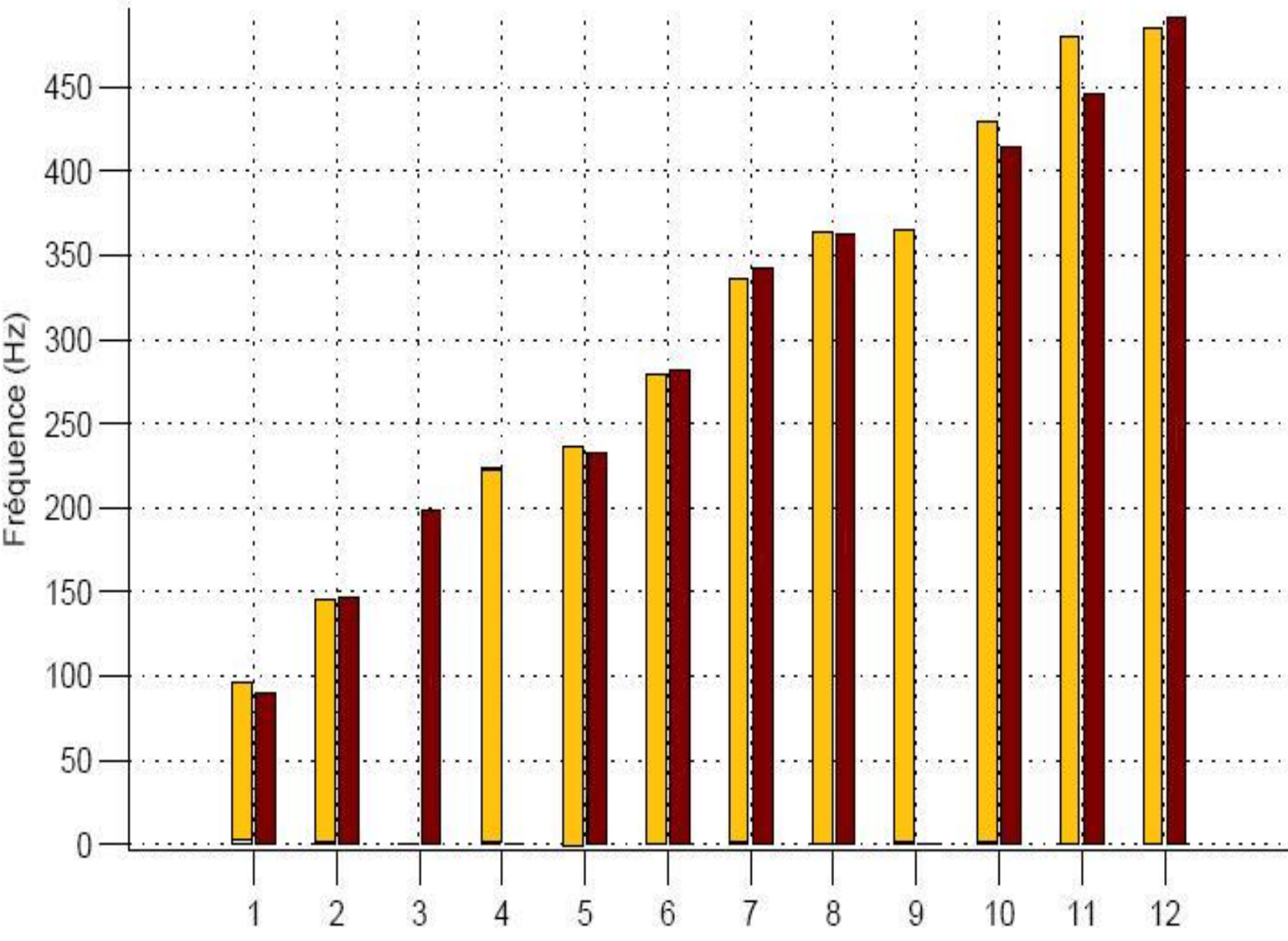
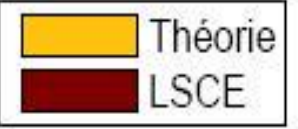


LSCE



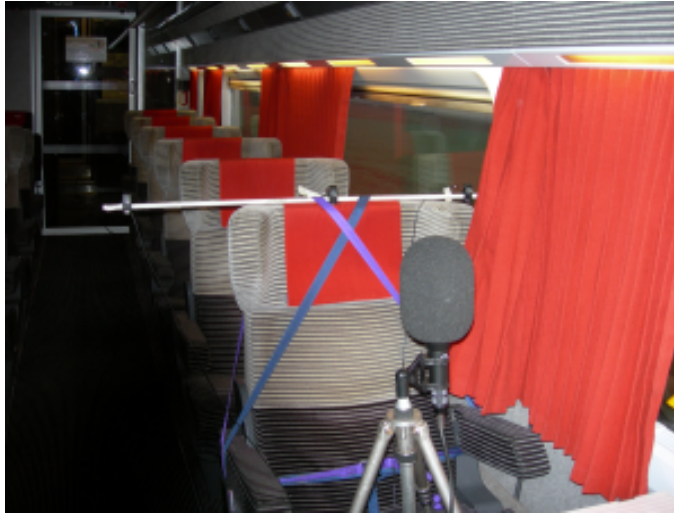
Signal d'accélération
sur la plaque



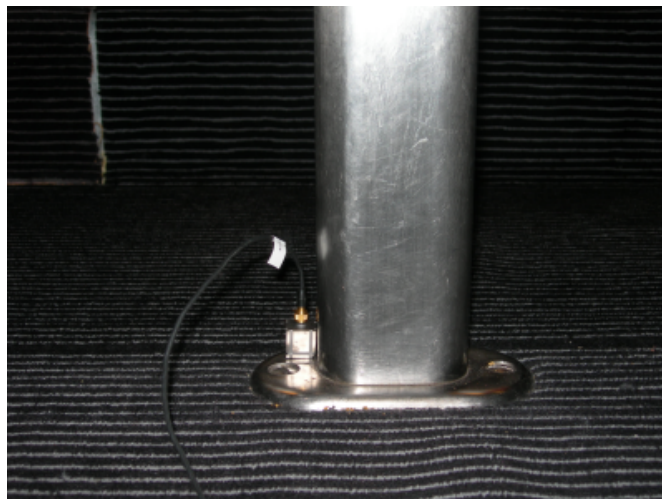


Numéro de la fréquence

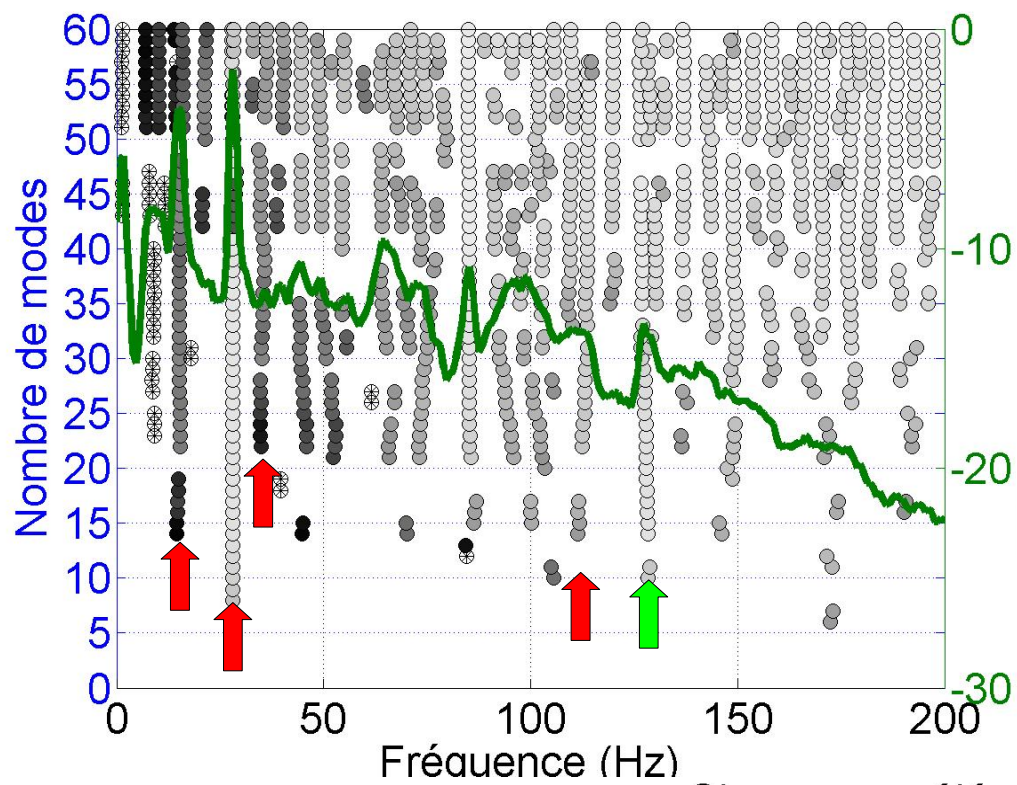
2. Le Train à Grande Vitesse : Expérimentation



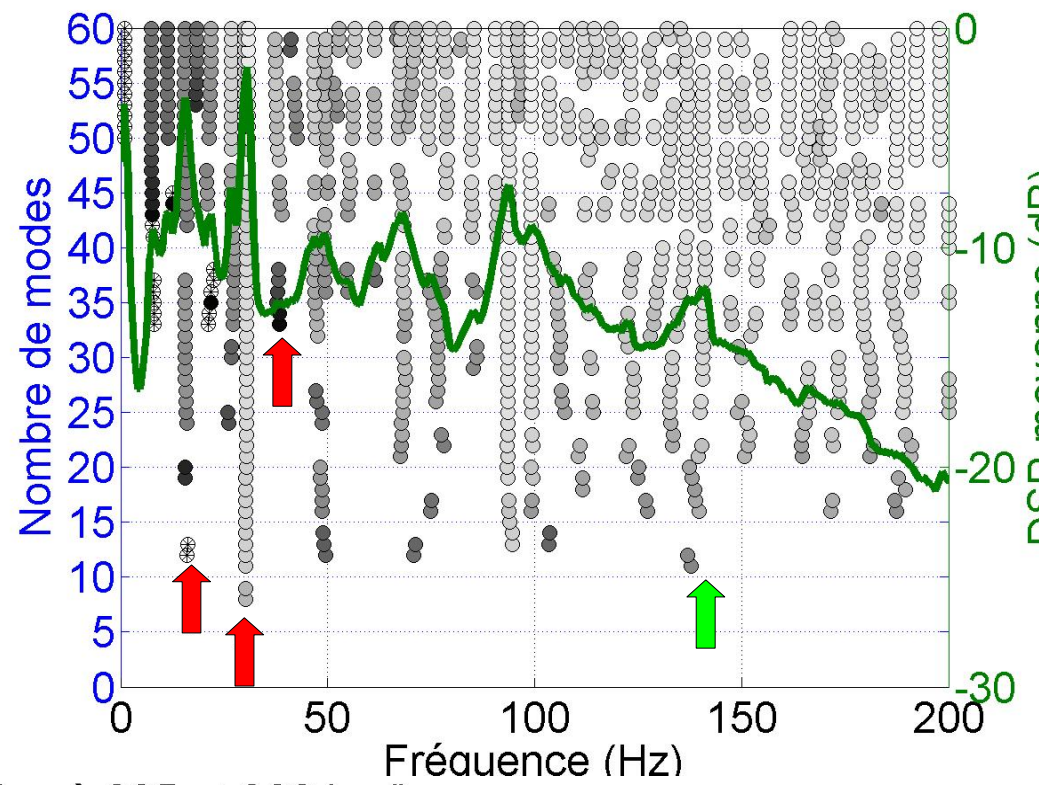
- 4 acc. 1D
- 1 acc. 3D
- 7 mic.



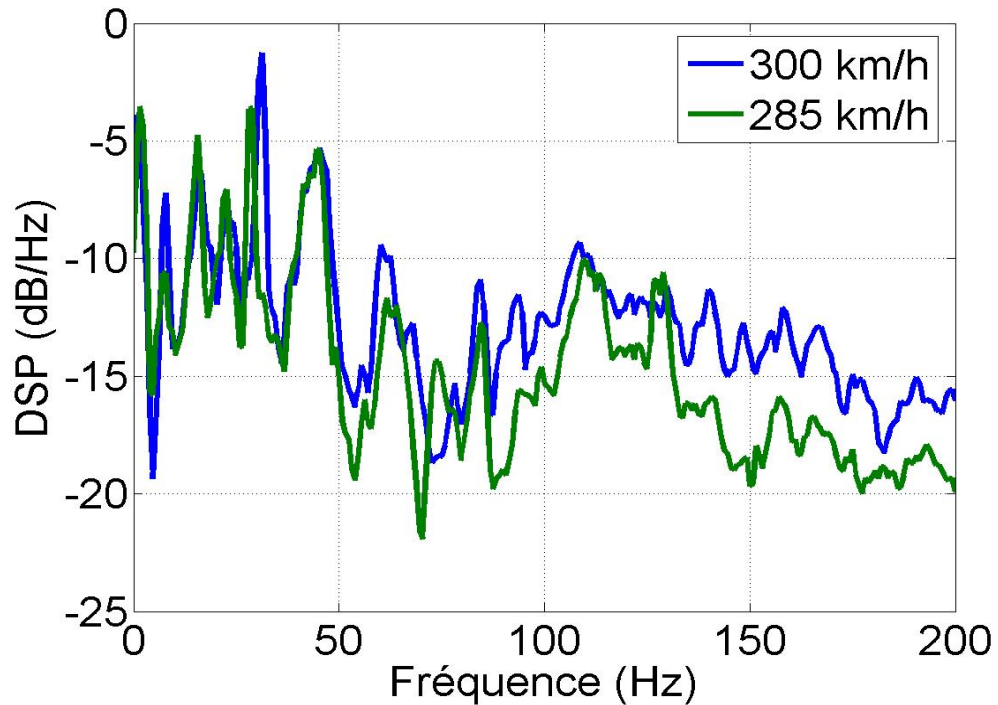
Accélération - methode LSCE - 285 km/h



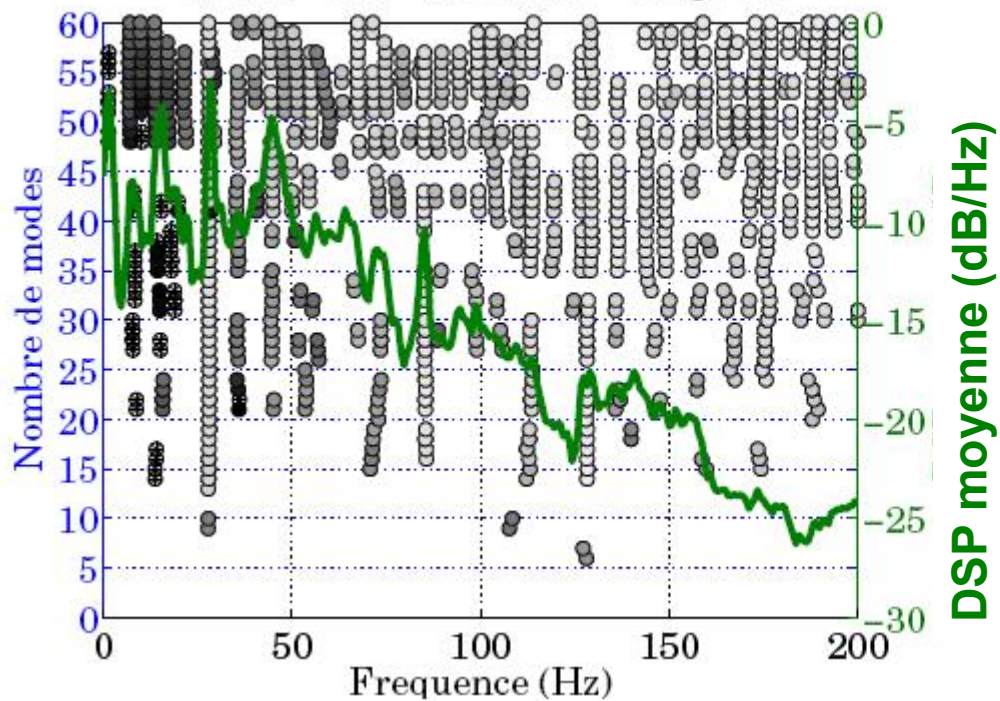
Accélération - methode LSCE - 300 km/h



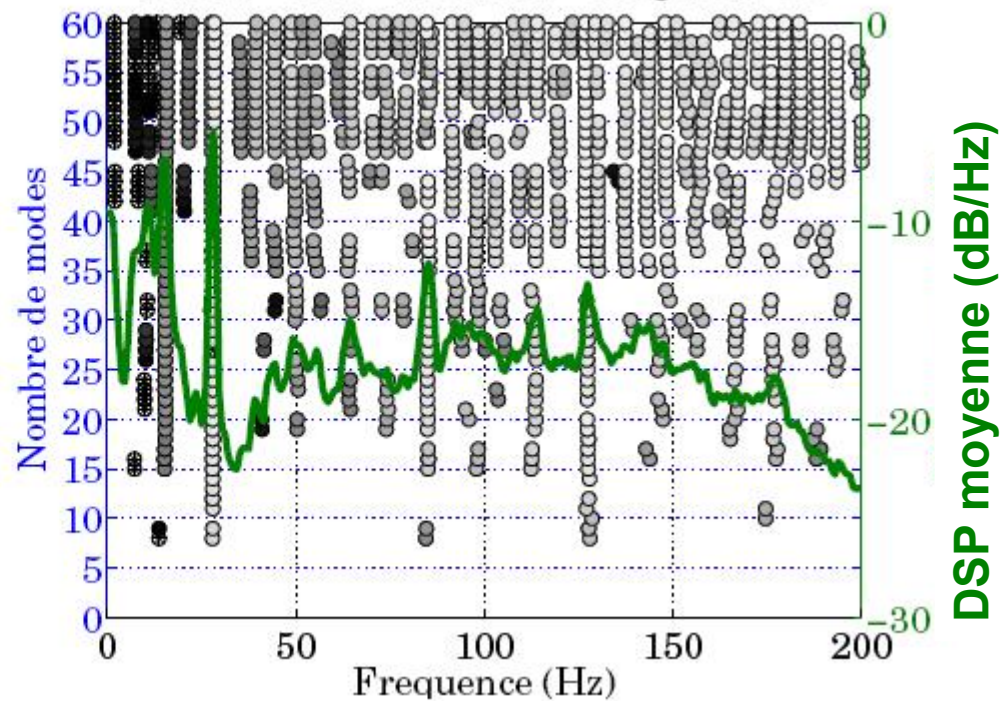
Signaux accélération à 285 et 300 km/h



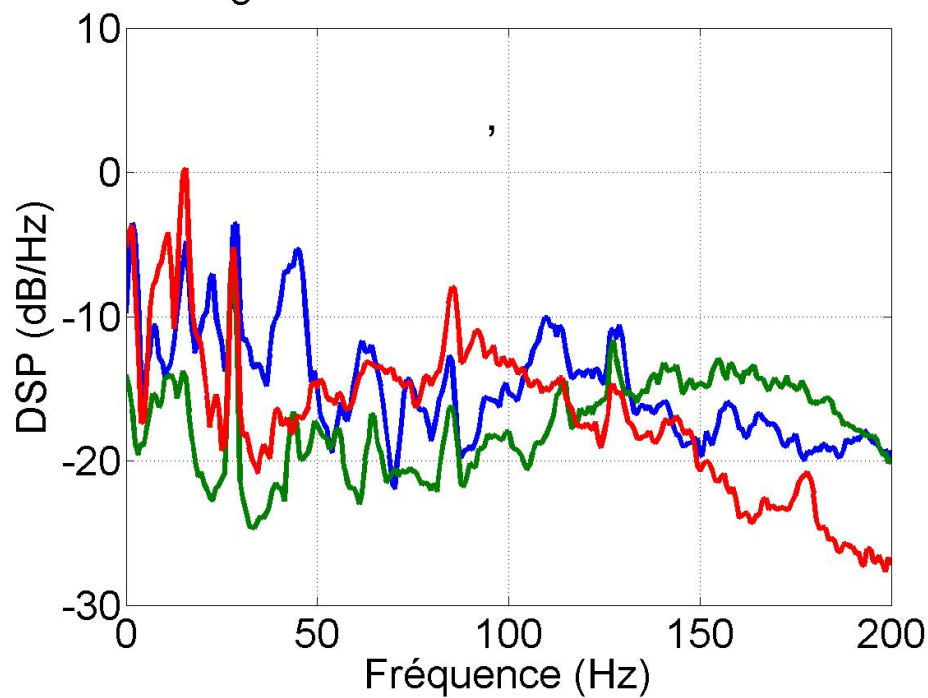
LSCE - Acc - 285 km/h - Siege 51

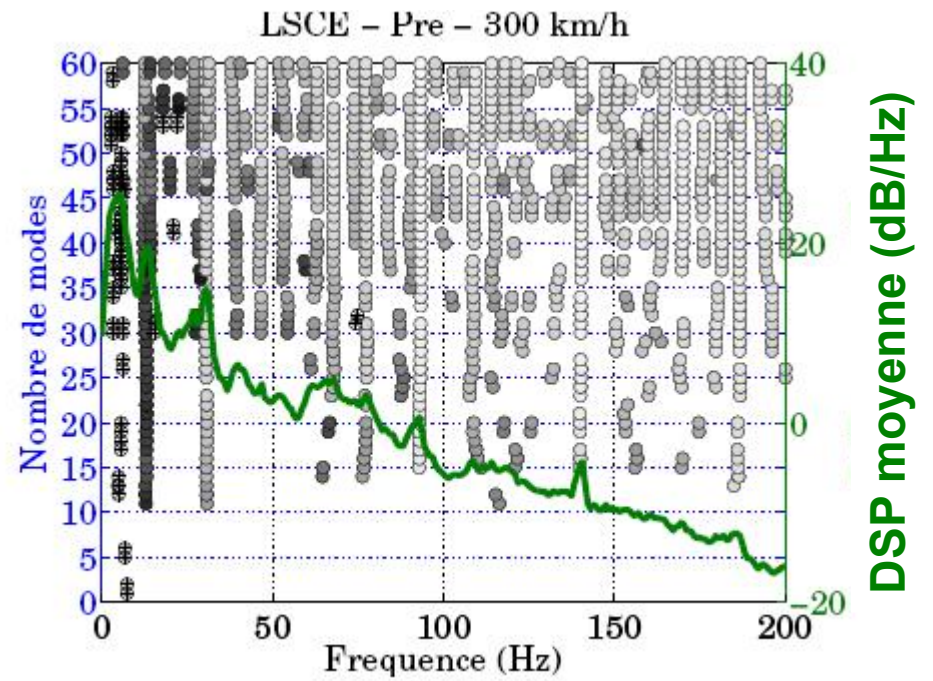
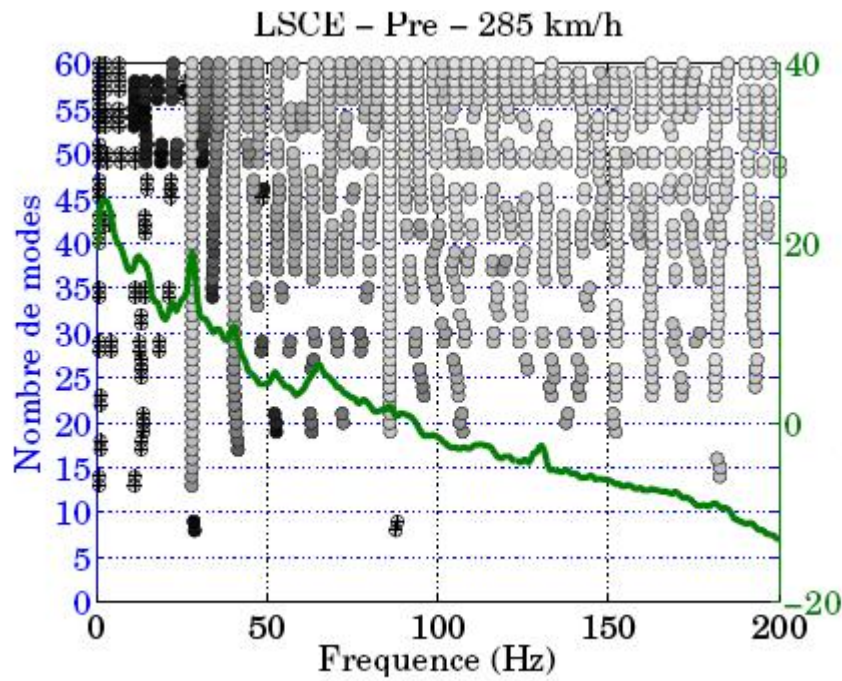


LSCE - Acc - 285 km/h - Sieges 82-83

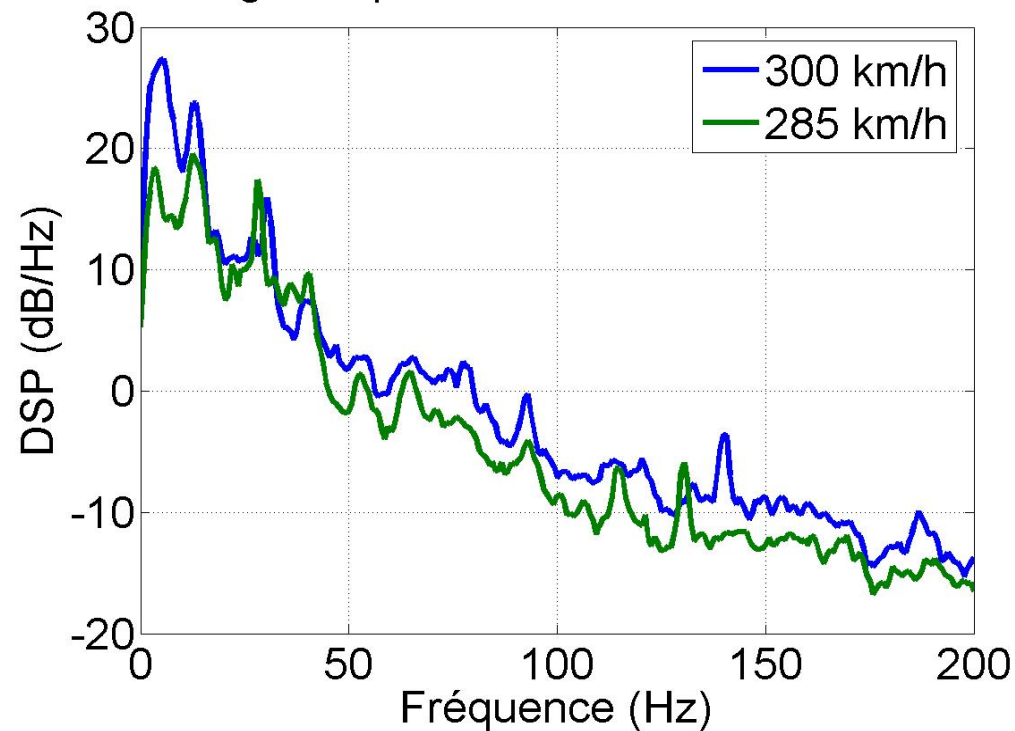


Signaux d'accélération à 285 km/h



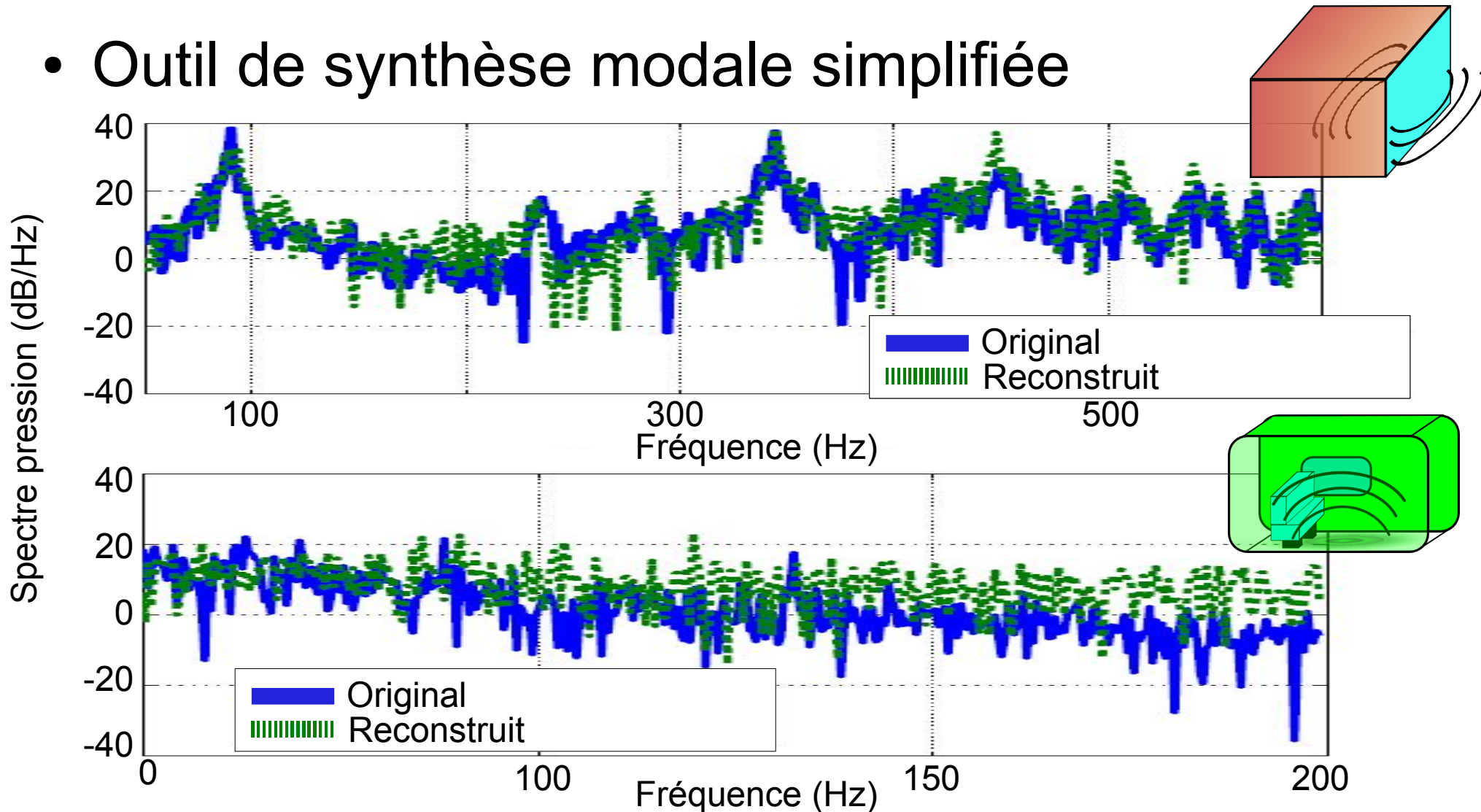


Signaux pression à 285 et 300 km/h



2. Le Train à Grande Vitesse : Synthèse AMO

- Outil de synthèse modale simplifiée



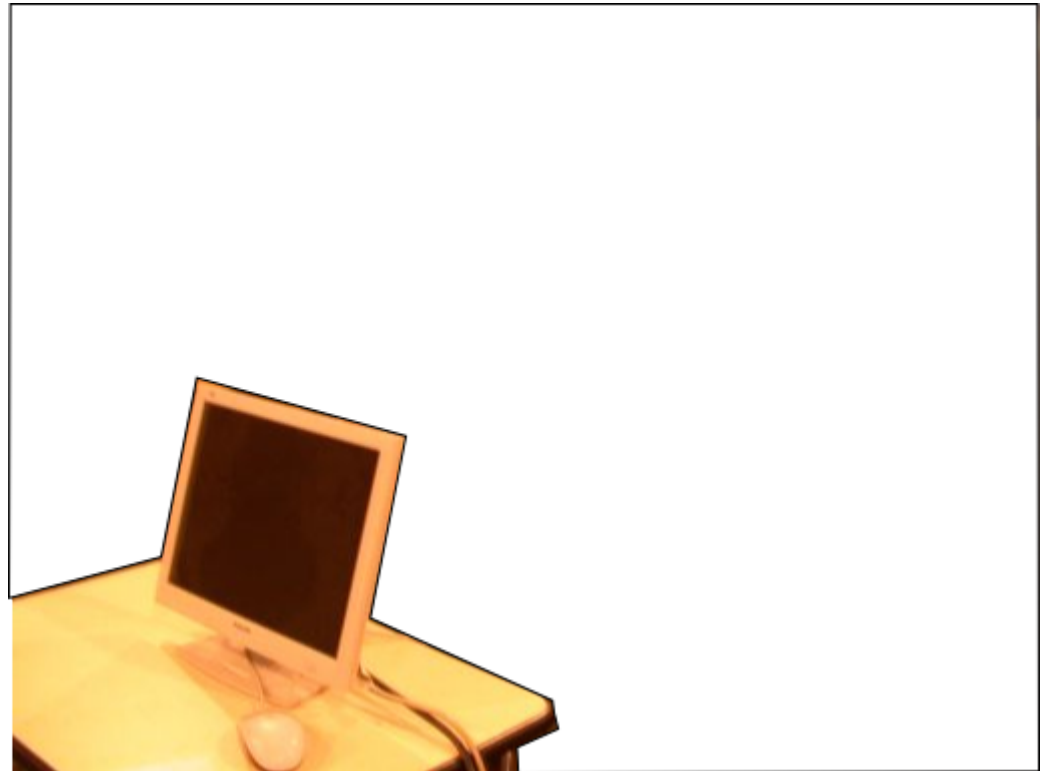
- Utilisable pour des tests perceptifs

2. Le Train à Grande Vitesse : Test perceptif

- Test sur des signaux expérimentaux
 - 13 signaux (BF: 30-200 Hz)
 - paramètres :
 - 2 trains : duplex (2 niveaux) et réseau (1 niveau)
 - 4 vitesses (de 200 à 350 km/h)
 - point d'écoute (salle haute/basse, milieu/extrémité)

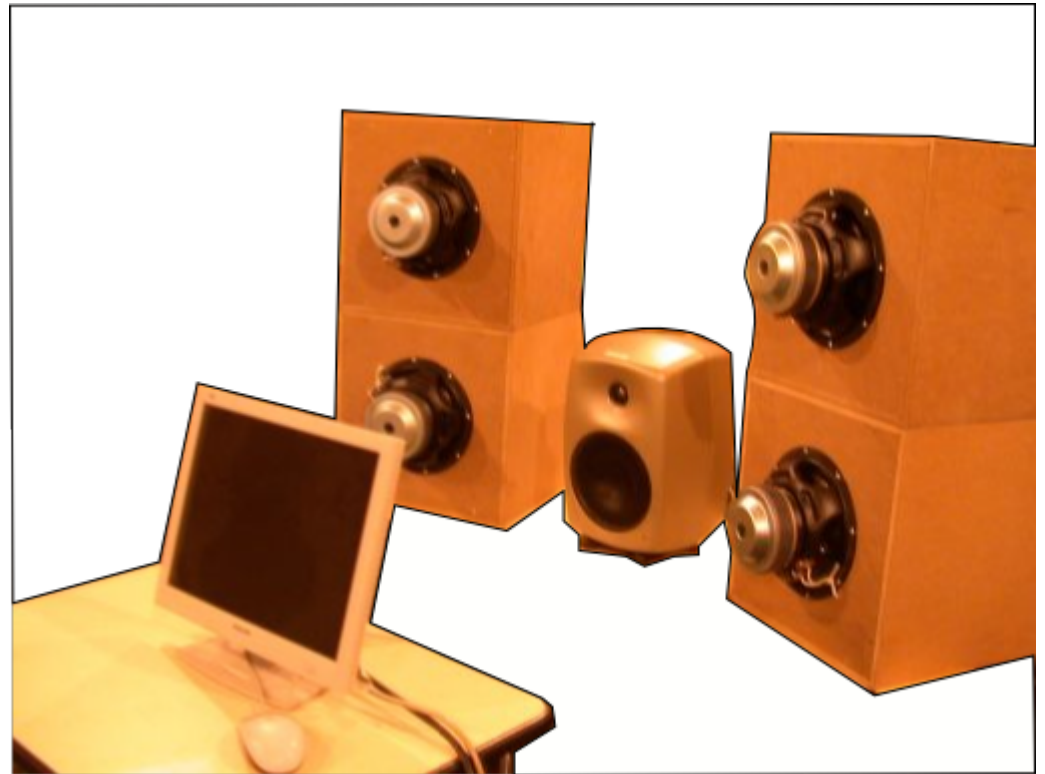
2. Le Train à Grande Vitesse : Test perceptif

- Test sur des signaux expérimentaux
 - 13 signaux (BF: 30-200 Hz)
 - 22 auditeurs



2. Le Train à Grande Vitesse : Test perceptif

- Test sur des signaux expérimentaux
 - 13 signaux (BF: 30-200 Hz)
 - 22 auditeurs
 - haut-parleurs



2. Le Train à Grande Vitesse : Test perceptif

- Test sur des signaux expérimentaux
 - 13 signaux (BF: 30-200 Hz)
 - 22 auditeurs
 - haut-parleurs
 - chambre sourde



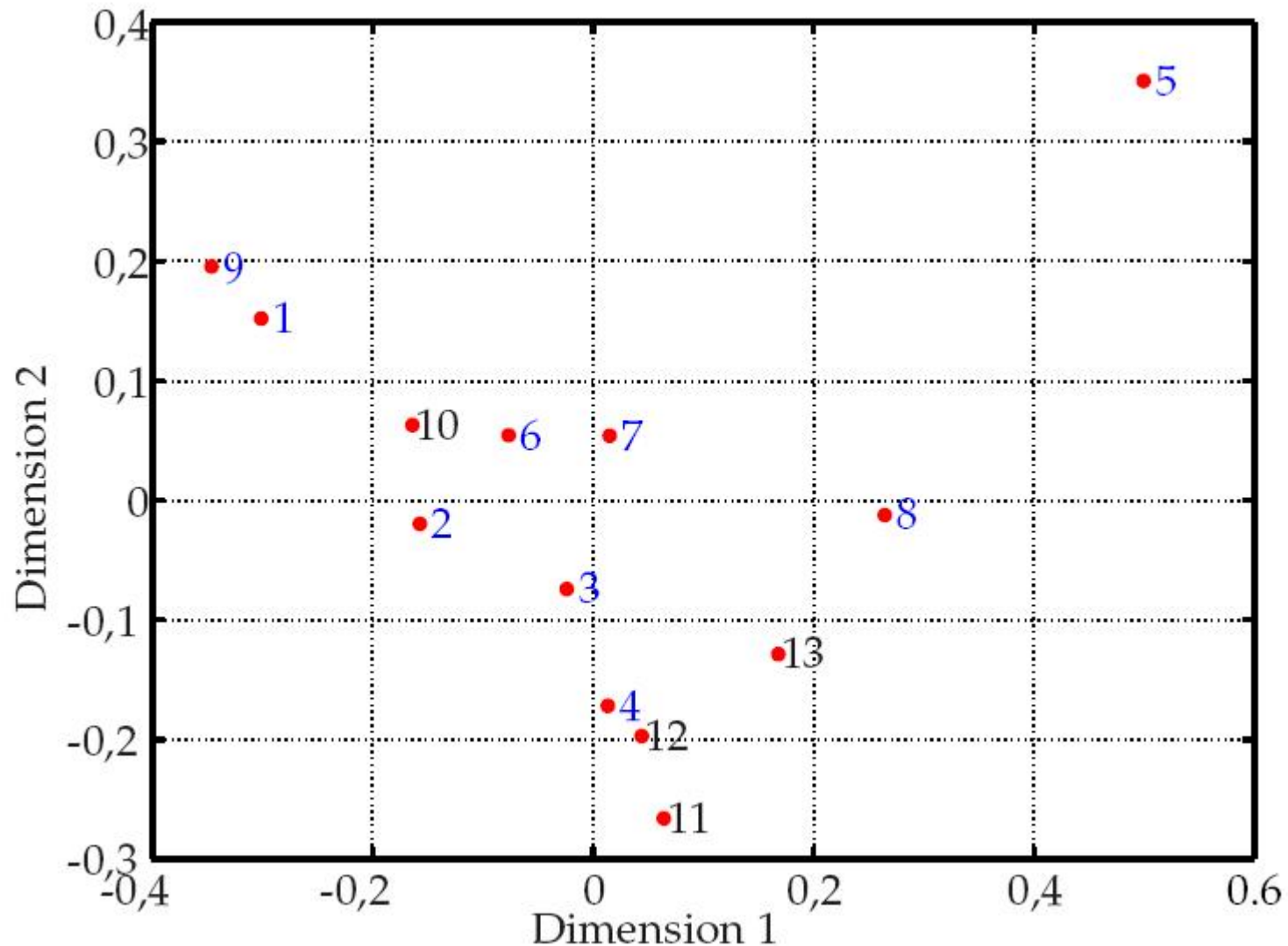
2. Le Train à Grande Vitesse : Test perceptif

- Test sur des signaux expérimentaux
 - 13 signaux (BF: 30-200 Hz)
 - 22 auditeurs
 - haut-parleurs
 - chambre sourde

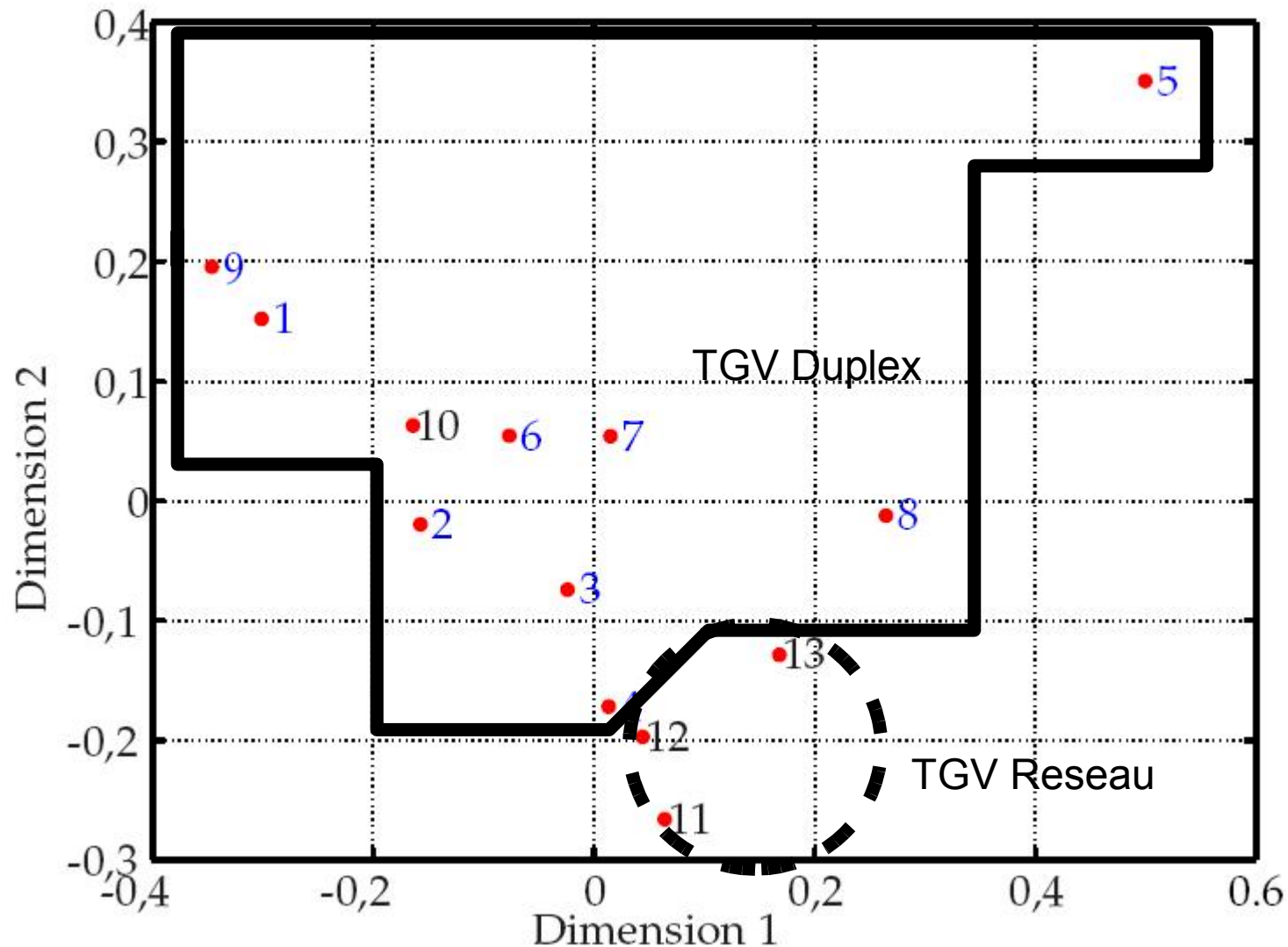


- **Résultat : espace perceptif à 2 dimensions**

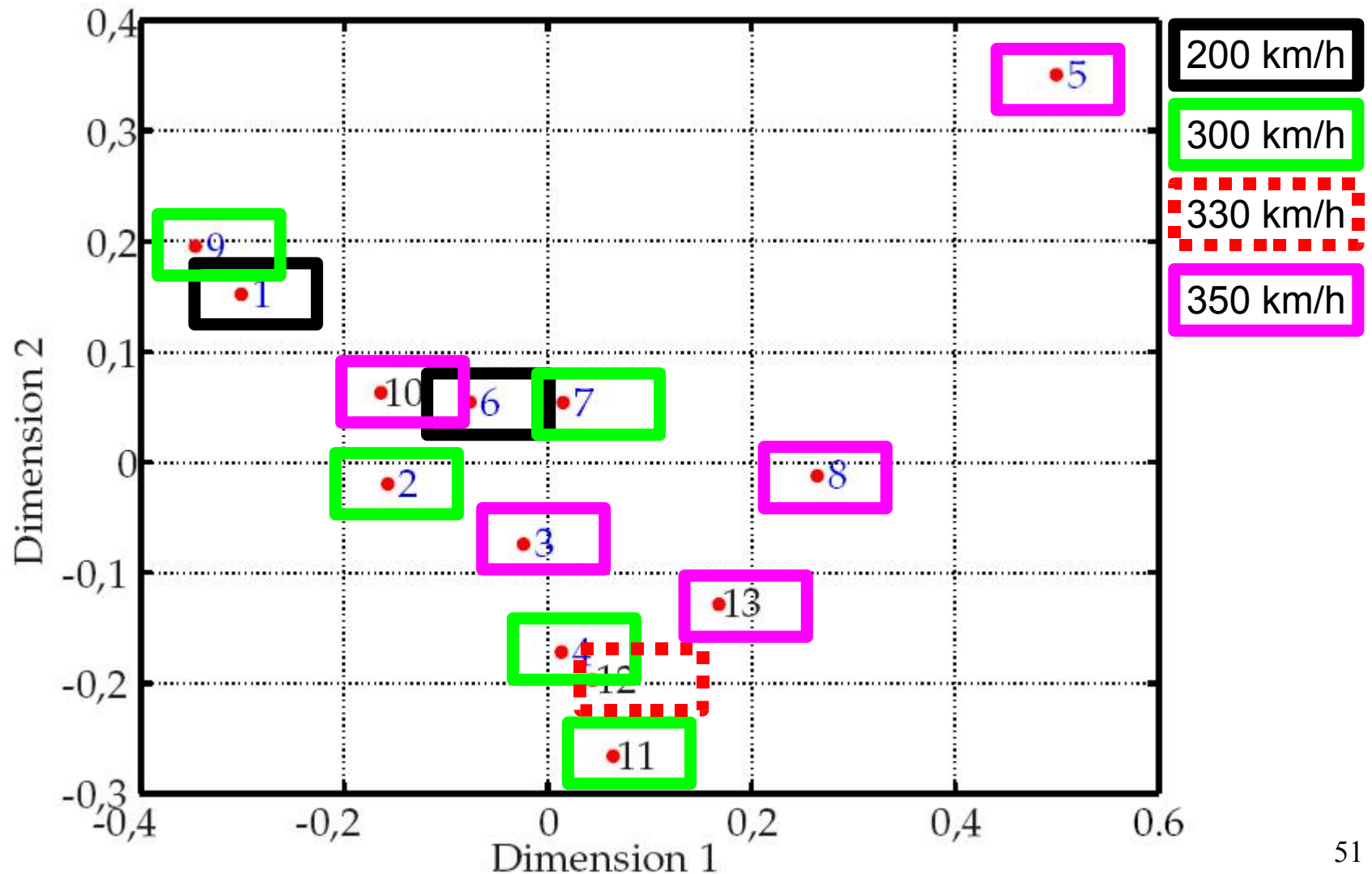
2. Le Train à Grande Vitesse : Test perceptif



2. Le Train à Grande Vitesse : Test perceptif



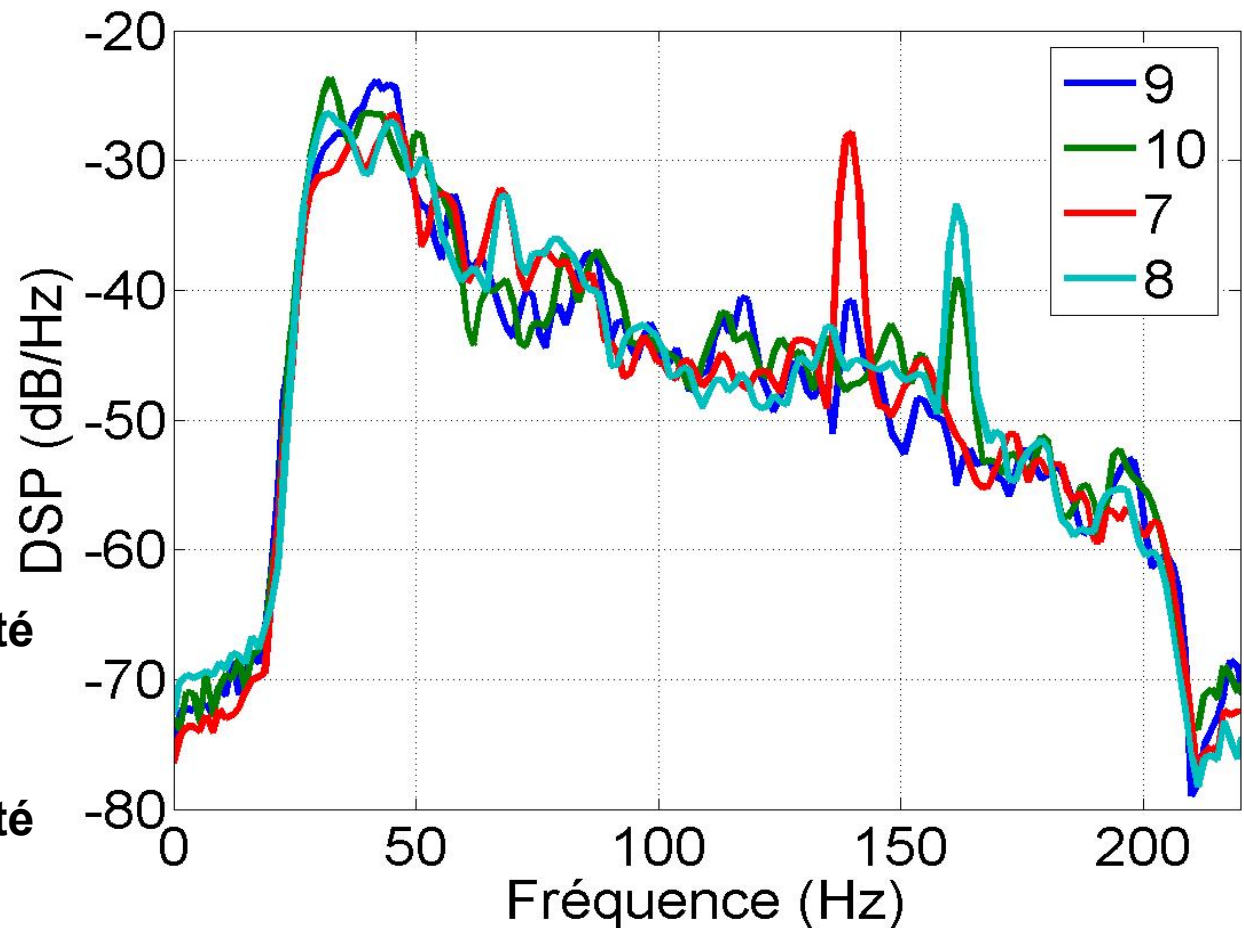
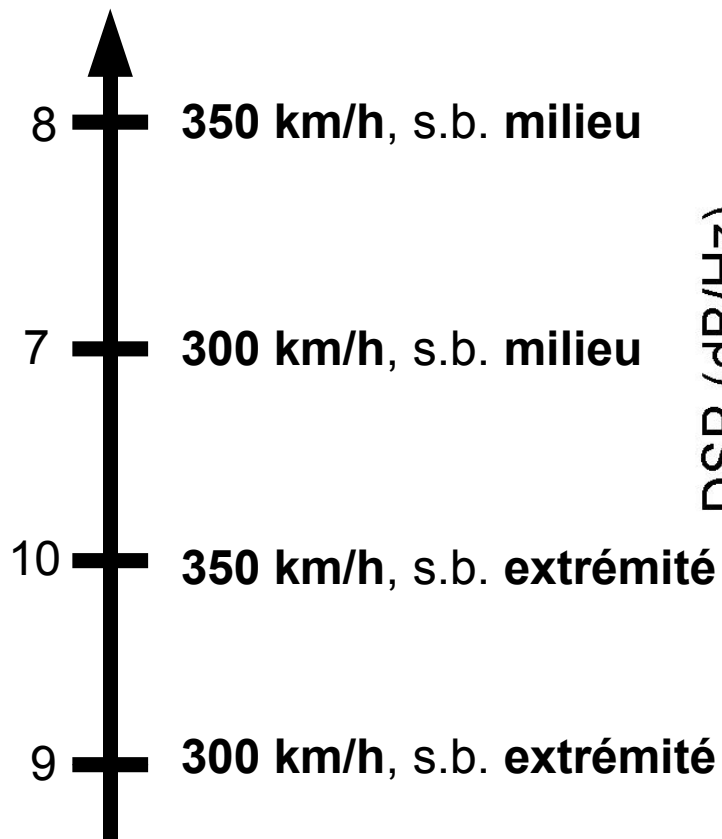
2. Le Train à Grande Vitesse : Test perceptif



2. Le Train à Grande Vitesse : Test perceptif

- Dimension 1 : excitation roue-rail (fréquence et niveau sonore)

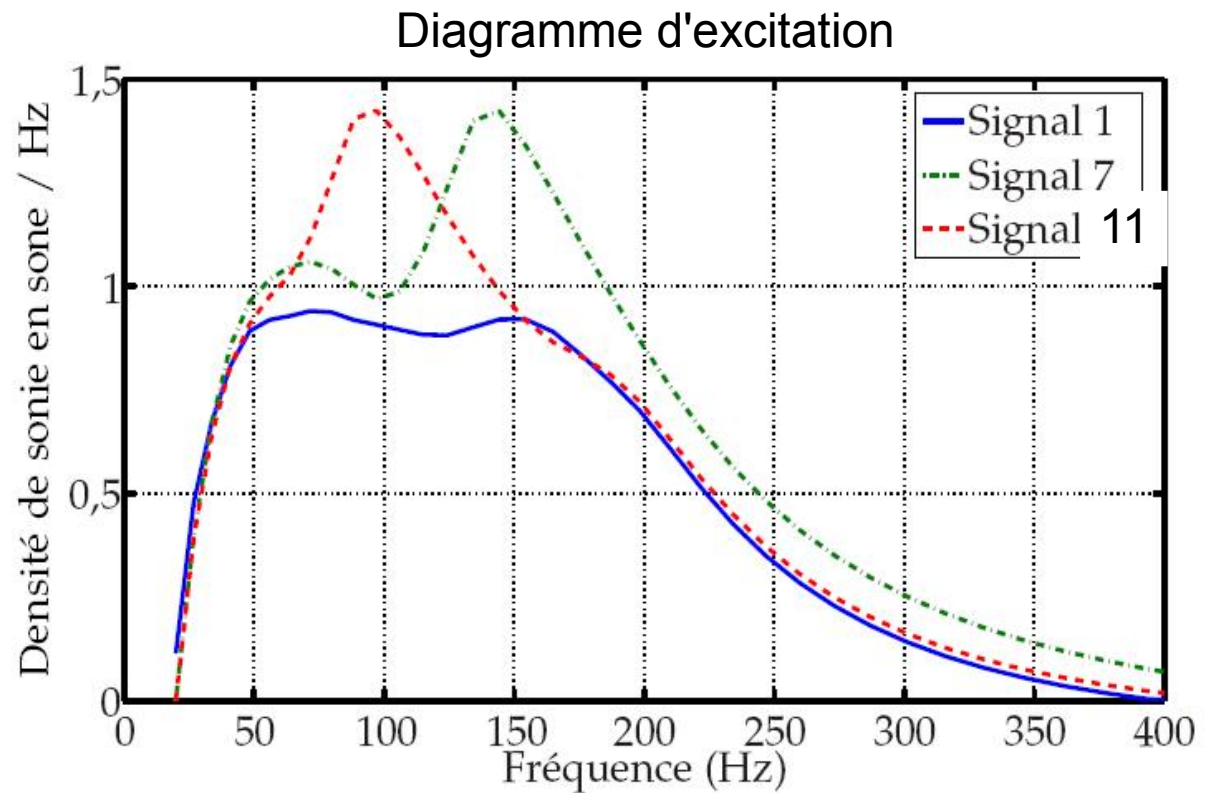
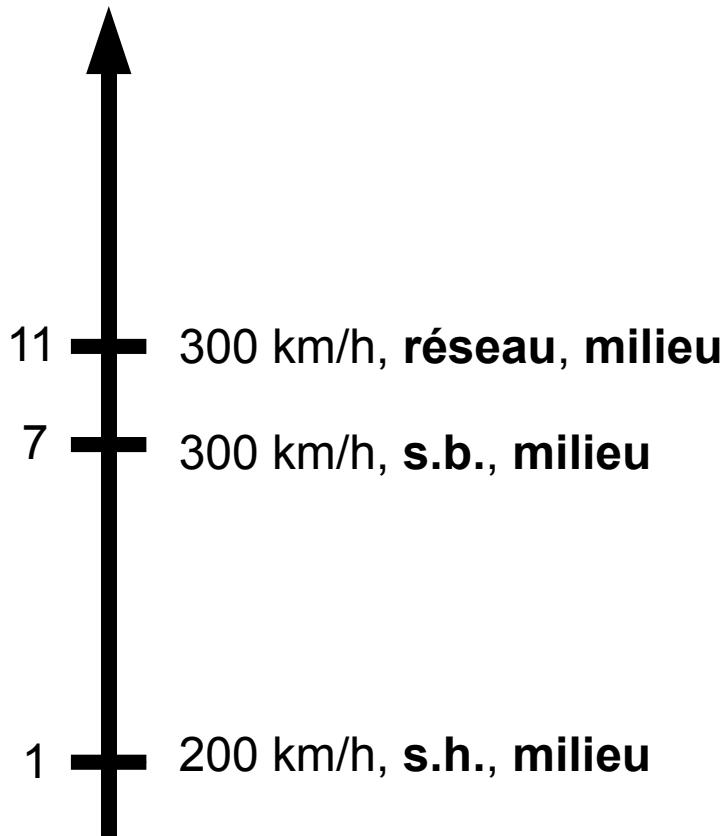
Dimension 1



2. Le Train à Grande Vitesse : Test perceptif

- Dimension 2 : basses fréquences < 100 Hz

Dimension 2



3. Conclusions

- **Psychomécanique plaque/cavité** : Outil et méthode de quantification perceptive de :
 - la précision numérique
 - l'influence de matériaux
- **AMO** : Outil et méthode de resynthèse à partir d'une caractérisation expérimentale
- **Psychomécanique TGV** : influence de la vitesse, position dans le train et distinction entre TGV selon les BF
- **Premiers paramètres testés ...**
- **... mais il en reste d'autres encore**
 - ex. : matériaux de plaque, position de revêtement

3. Perspectives

- A court terme :
 - Système plaque/cavité : améliorer la prise en compte de l'amortissement
(thèse L. Zoghaib, Optimisation acoustique de plaques sandwich viscoélastiques, Université de la Méditerranée, 2006)
 - AMO : meilleure synthèse et précision de l'amortissement
- A plus long terme :
 - Outil de modélisation simplifiée du comportement vibroacoustique prenant en compte la dimension perceptive



Vitesse 573/3

PK 143

2

DIRECT

13:13

Travaux LMA

- Travaux réalisés au LMA

- i. D.Habault, P. Fillipi, P-O. Mattei :

- modélisation du rayonnement de plaques vibrantes

- ii. D. Habault, S. Meunier, G. Canévet, F. Demirdjian :

- perception du rayonnement de plaques vibrantes.

- i. D. Habault, P. Filippi, "A Numerical Method for the Computation of the Resonance Frequencies and Modes of a Fluid-Loaded plate : Application to the Transient Response of the System", J. Sound Vib. (2004), 270, p. 207-231.

- ii. G. Canévet, D. Habault, S. Meunier, F. Demirdjian, "Auditory Perception of Sounds Radiated by a Fluid-Loaded Vibrating Plate Excited by a Transient point force ", Acta Acustica/Acustica (2004), 90, p. 181-193.

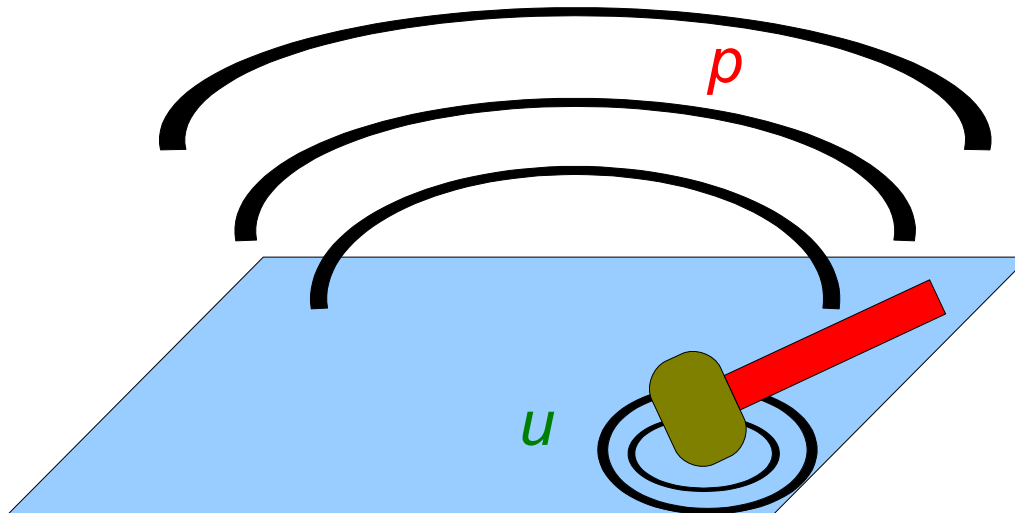
Travaux LMA

D. Habault, P. Fillipi, P-O. Mattei : Modélisation du rayonnement de plaques minces vibrantes

Equations de base :

E1) équation d'Helmholtz : pression p

E2) équation de plaque vibrante : déplacement u , pression p



Travaux LMA

D. Habault, P. Fillipi, P-O. Mattei : Modélisation du rayonnement de plaque mince

Equations de base :

E1) équation d'Helmholtz : pression p

E2) équation de plaque vibrante : déplacement u , pression p

Resolution :

R1) E1 > expression de p en fonction de u : fonction de Green

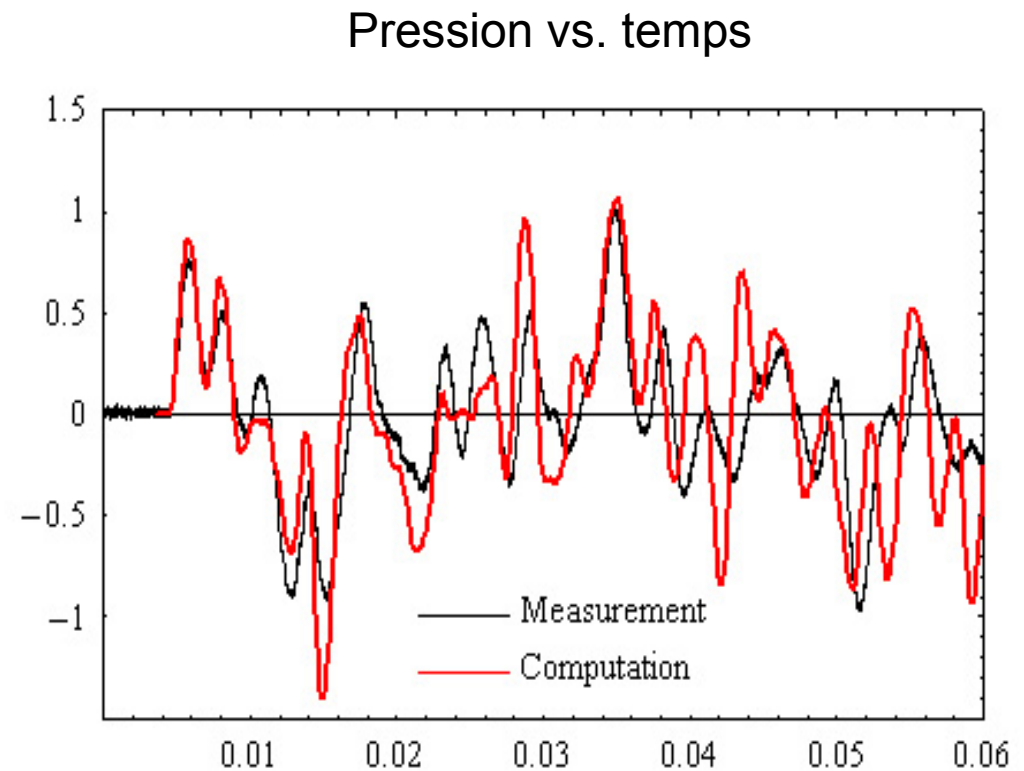
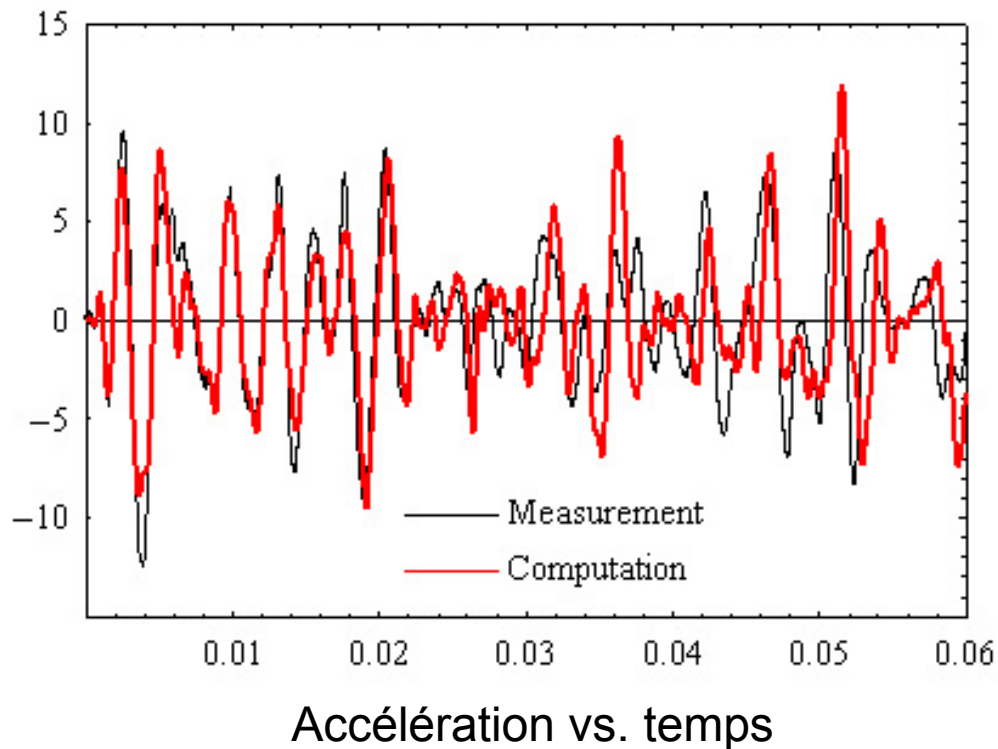
R2) E2+R1 > découplage de l'équation de la plaque vibrante : u

R3) décomposition en série de modes dits de résonance (hypothèse de fluide léger)

R4) pression p obtenue par R1 (Kirchhoff-Helmoltz)

Travaux LMA

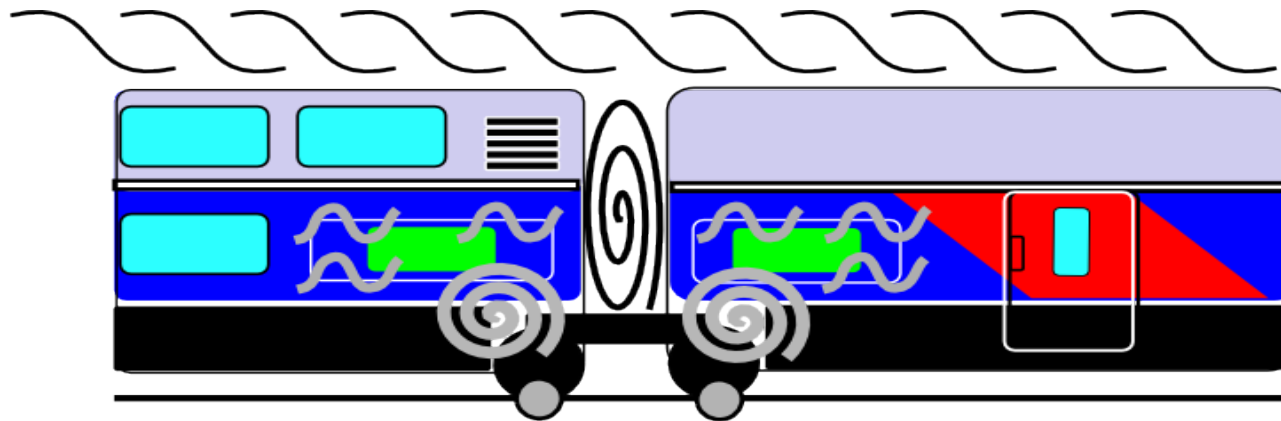
D. Habault, P. Fillipi, P-O. Mattei : Modélisation du rayonnement de plaque mince








Travaux SNCF

Bruit propre à la voiture :

Sources excitatrices



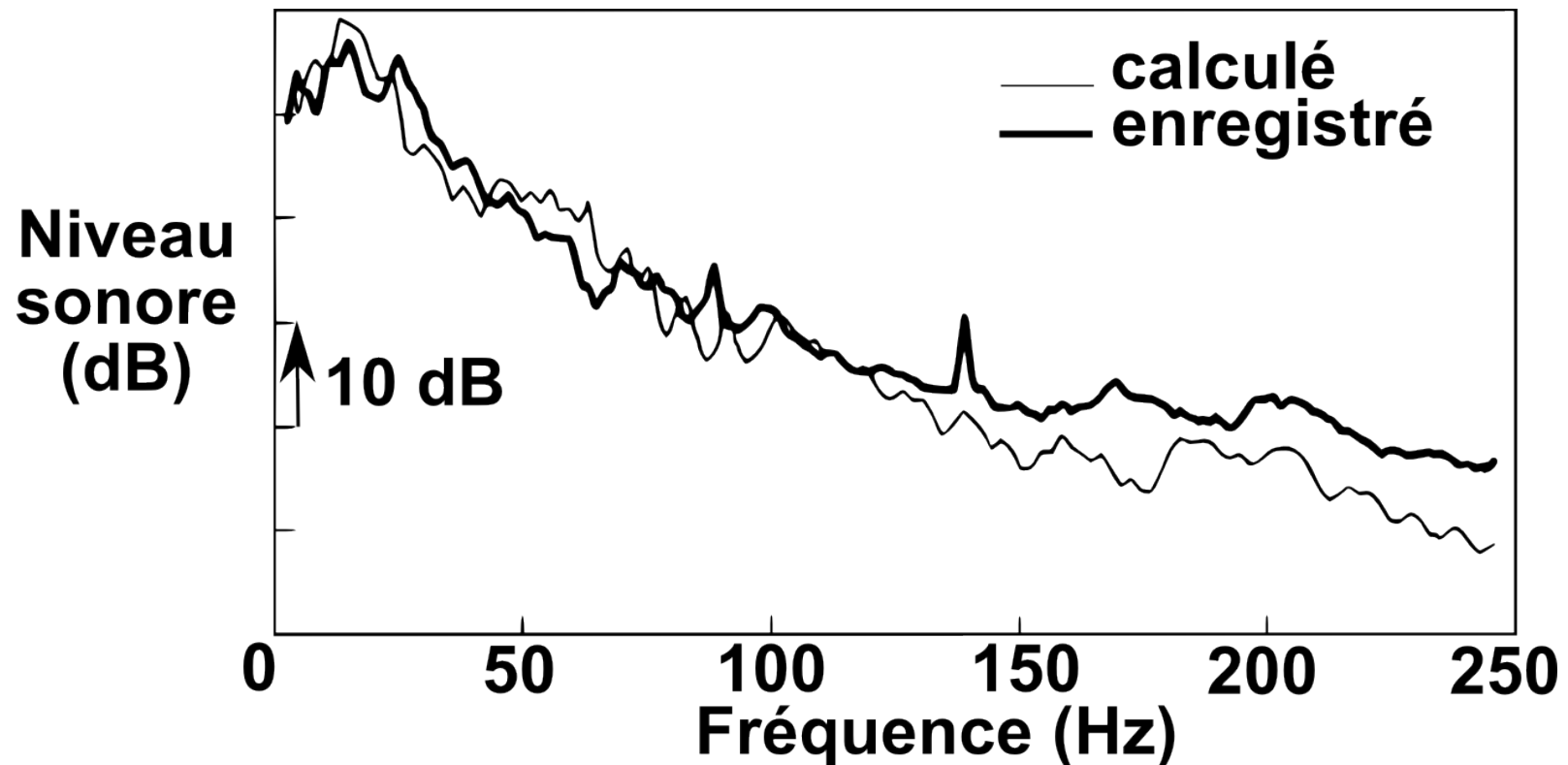
-  Couche limite turbulente
-  Turbulences entre les deux voitures
-  Turbulences autour des bogies
-  Bruit de roulement
-  Bruit équipements électriques

Source : F. Poisson, Bruit en salle TGV Etat de l'art, rapport de projet Capconfac, Unité physique du Systeme Ferroviaire et Confort, 2003

Travaux SNCF

Bruit propre à la voiture :

F. Letourneaux : modélisation basses fréquences

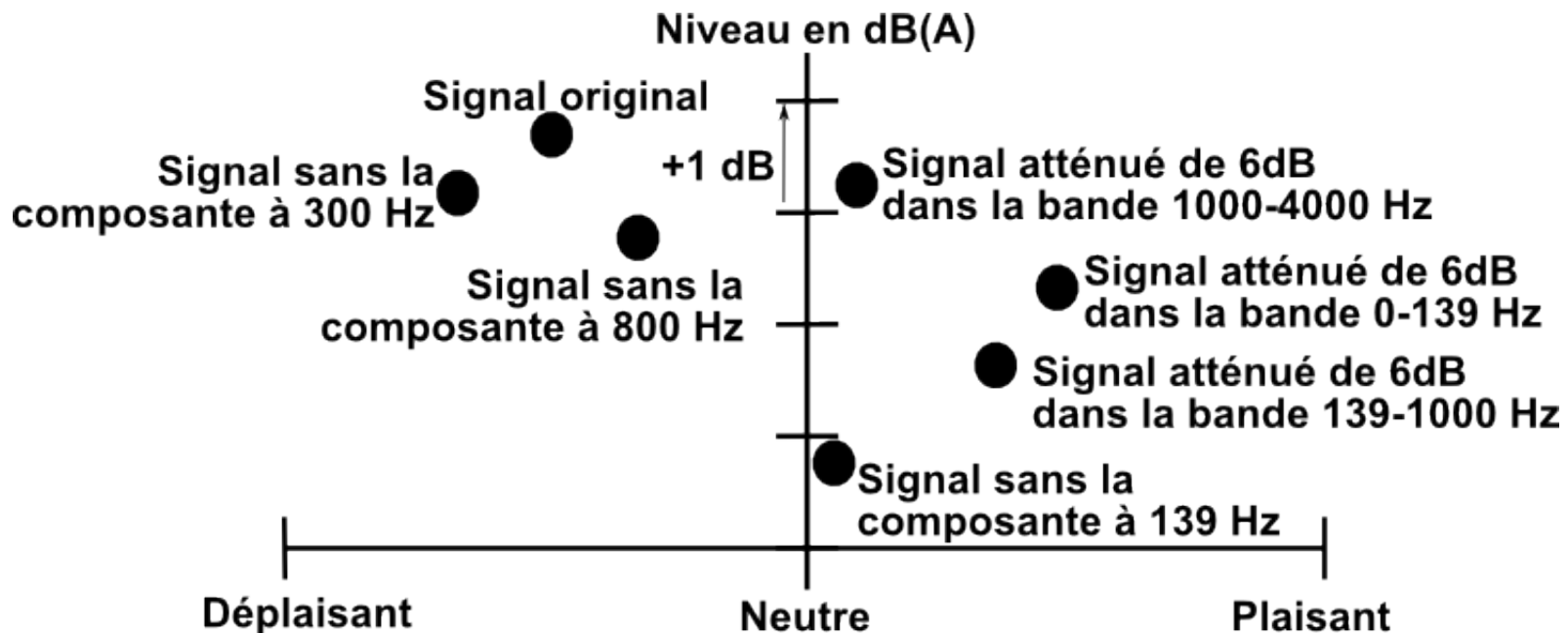


Source : F. Letourneaux, Comportement vibroacoustique de systèmes de grandes dimensions excités par des sources aéroacoustiques : application aux trains grandes vitesses, Thèse de doctorat, INSA, 1996

Travaux SNCF

Bruit propre à la voiture :

F. Letourneaux, S. Guerrand, F. Poisson : étude de la gêne relative à plusieurs zones du spectre audible

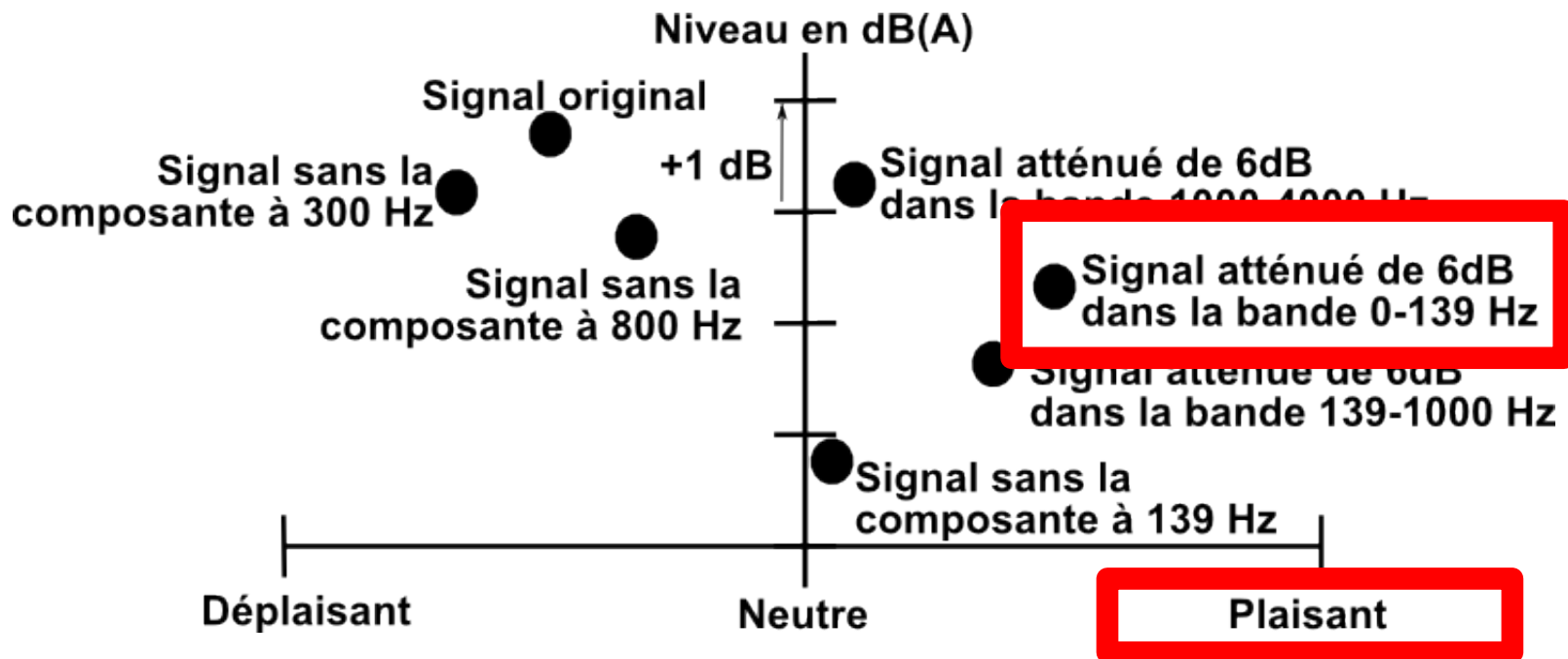


Source : F. Letourneaux, S. Guerrand, F. Poisson : Assessment of the acoustical comfort in high-speed trains at the SNCF: integration of subjective parameters, Journal of Sound and Vibration, 2000

Travaux SNCF

Bruit propre à la voiture :

F. Letourneaux, S. Guerrand, F. Poisson : étude de la gêne relative à plusieurs zones du spectre audible



Source : F. Letourneaux, S. Guerrand, F. Poisson : Assessment of the acoustical comfort in high-speed trains at the SNCF: integration of subjective parameters, Journal of Sound and Vibration, 2000

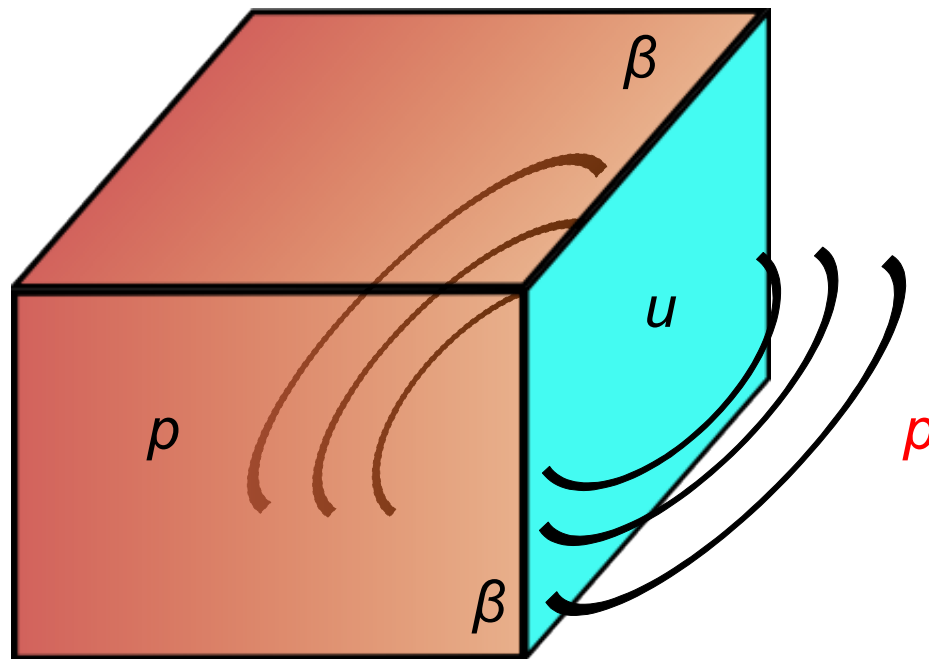
Le système plaque/cavité : modélisation

Equations de base :

E1) équation d'Helmholtz : pression p

E2) équation de plaque vibrante : déplacement u , pression p

E3) conditions aux limites des parois de la cavité : coefficient réflexion β



Le système plaque/cavité : modélisation

Resolution :

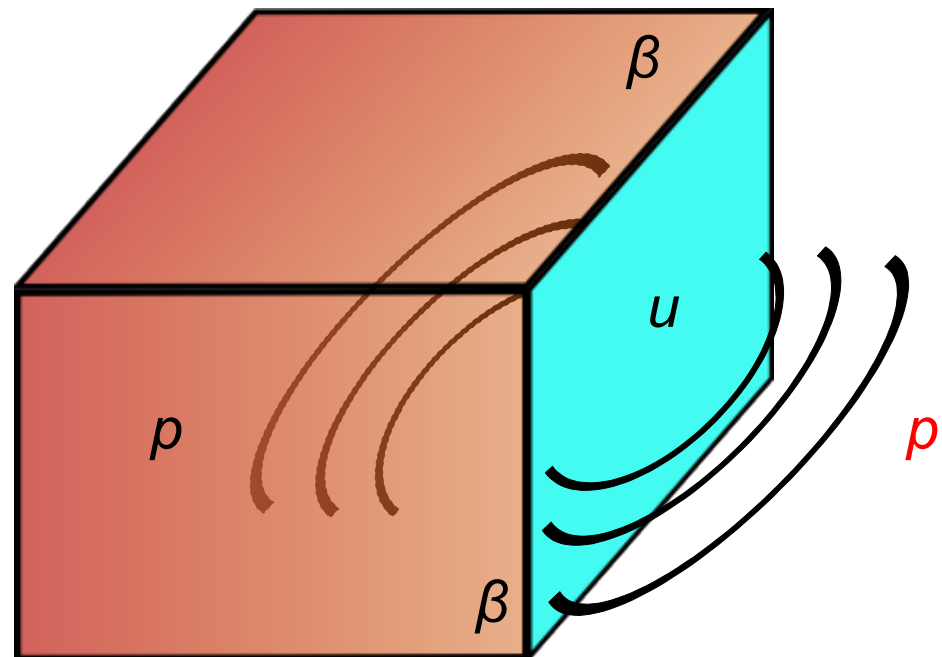
R1) E1 > expression de p en fonction de u : fonction de Green de la cavité \mathbf{G}

R2) expression de \mathbf{G} par une méthode d'images : $\mathbf{G} = \sum \beta.g$

R3) E2+R2 > découplage de l'équation de la plaque vibrante : u

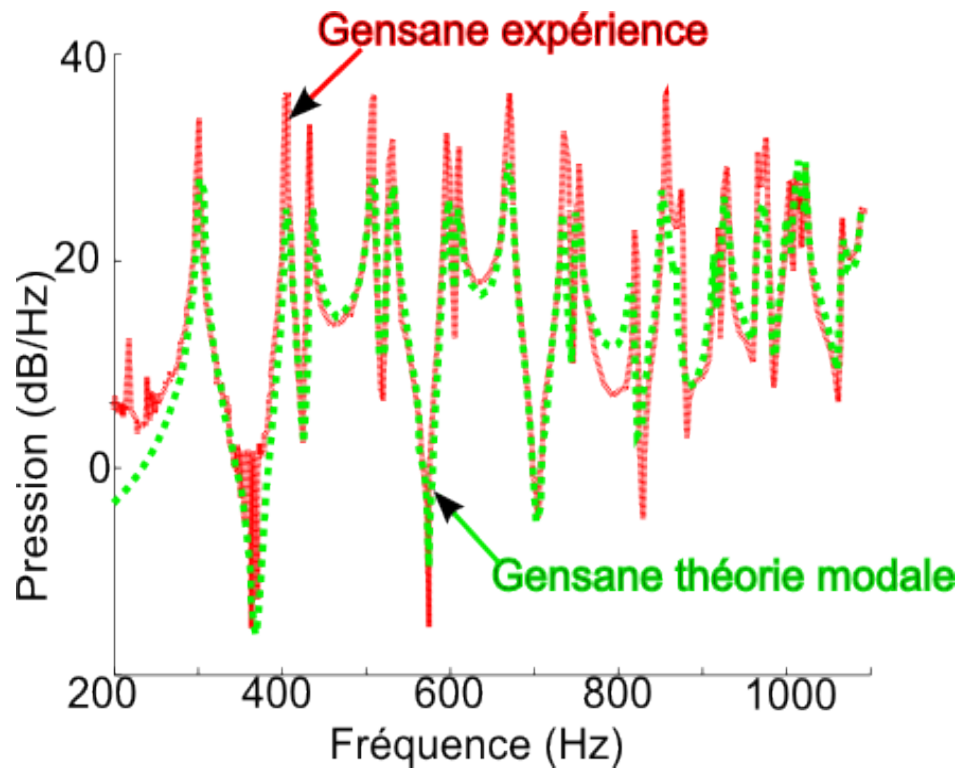
R4) décomposition en série de modes dits de résonance (hypothèse de fluide léger)

R5) pression p obtenue par R1



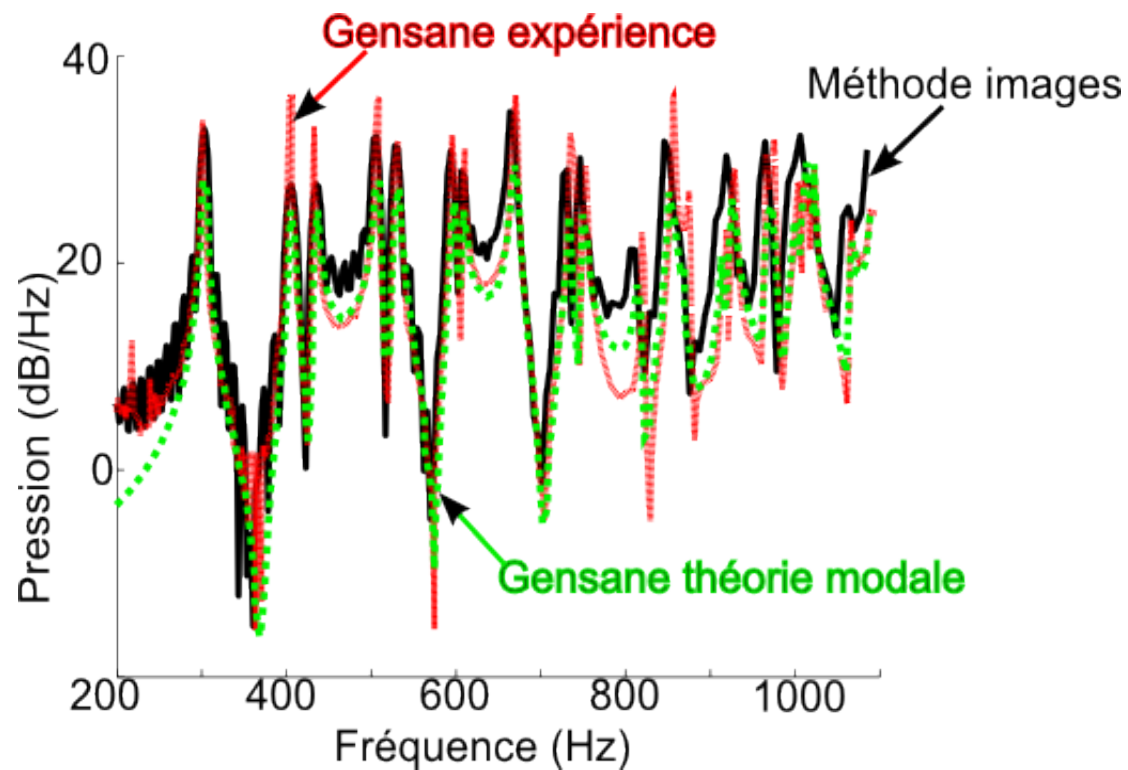
Le système plaque/cavité : comparaison

- Calcul de la fonction de Green :
comparaison état de l'art



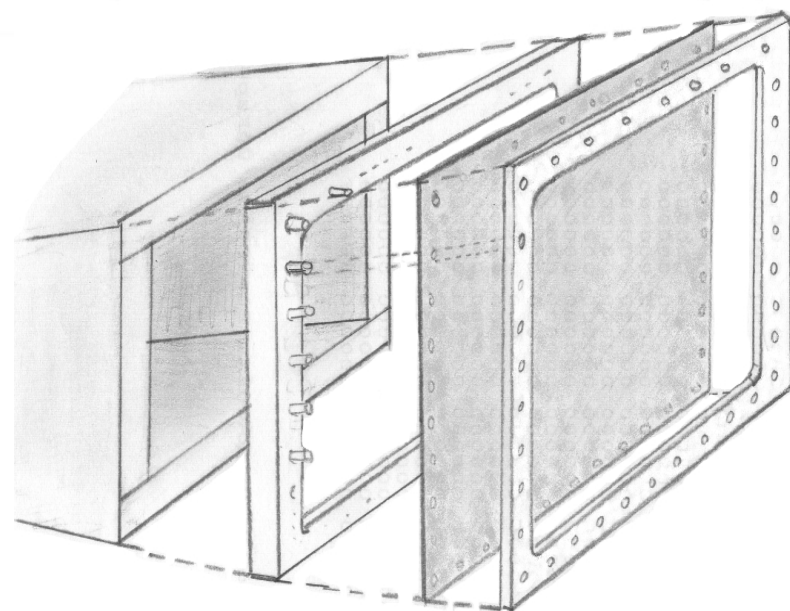
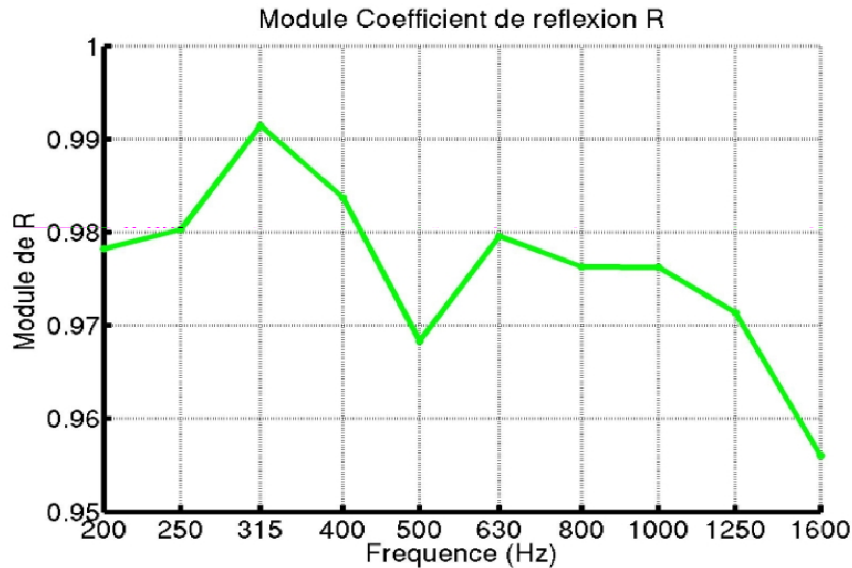
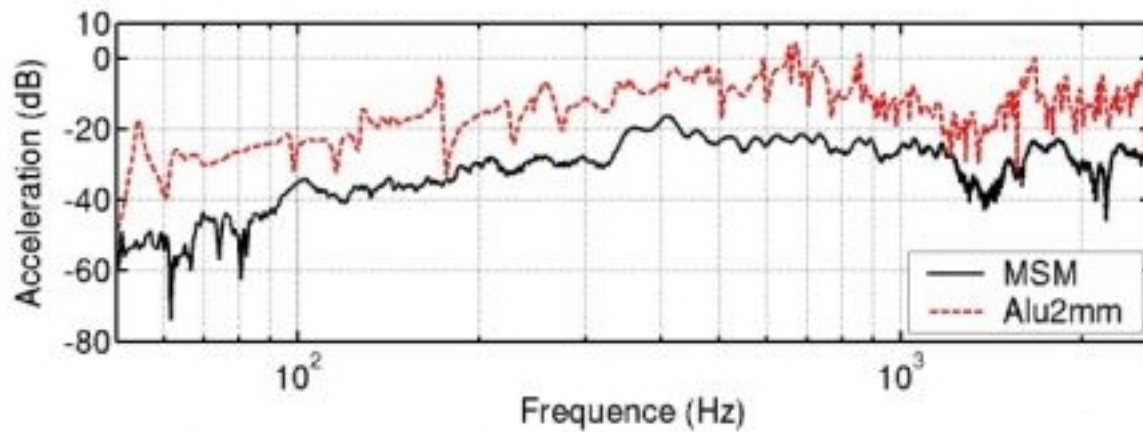
Le système plaque/cavité : comparaison

- Calcul de la fonction de Green :
comparaison état de l'art



Le système plaque/cavité : comparaison

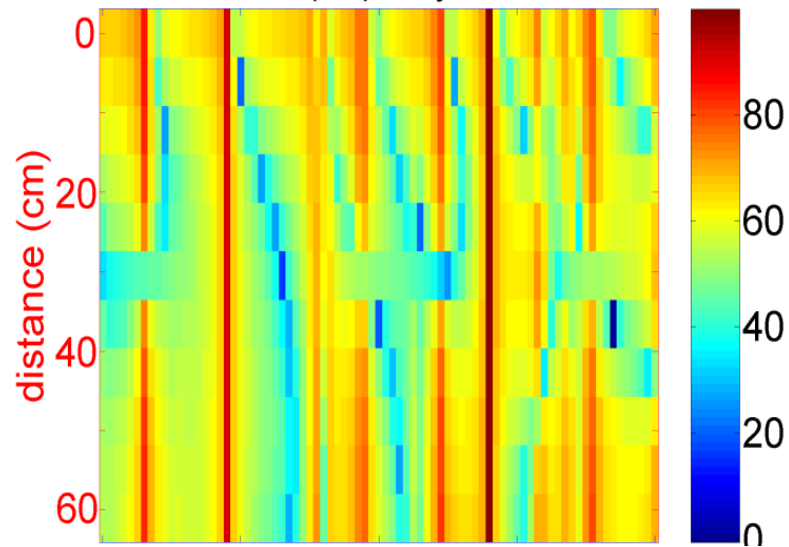
- Expérience :



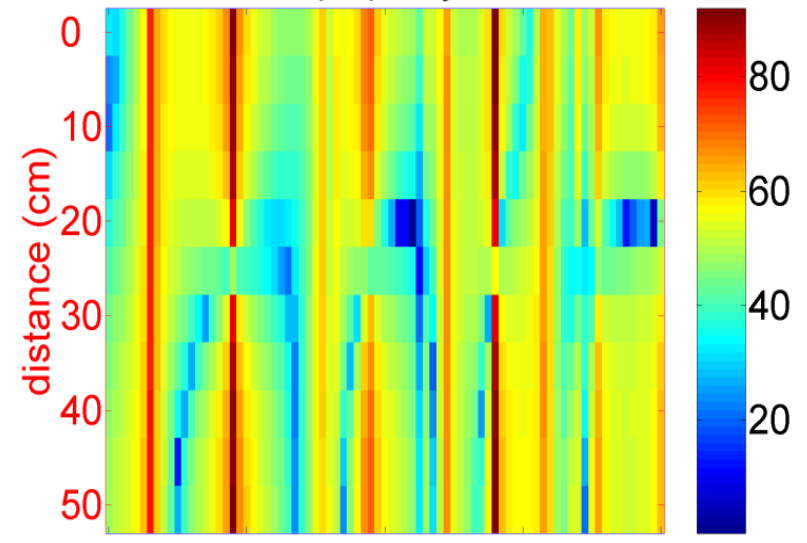
Le système plaque/cavité : comparaison

Éléments finis

Pressure level (dB) - Sysnoise - Mic. K

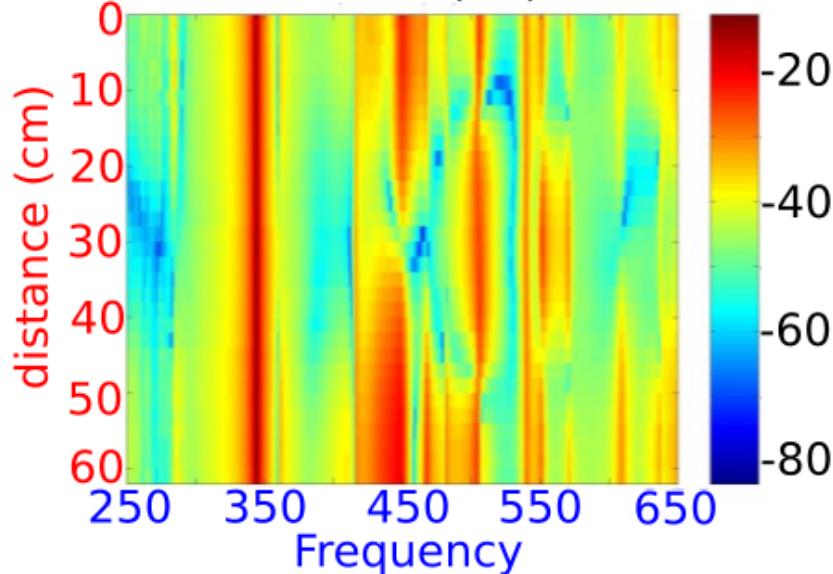


Pressure level (dB) - Sysnoise - Mic. B

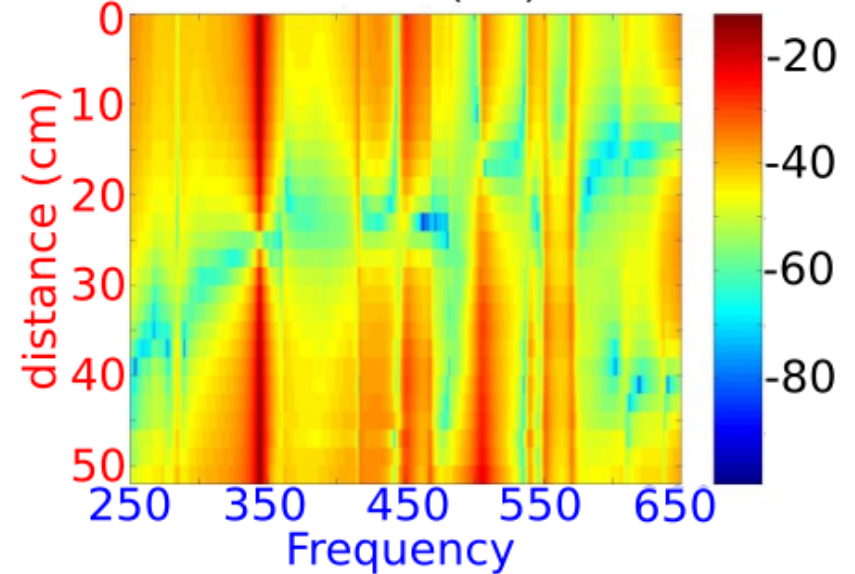


Expérience

Pressure level (dB)-Mic. K



Pressure level (dB)-Mic. B



Tests perceptifs

- Test de dissemblance :

1 - Quantifiez la dissemblance grace a l'ascenseur horizontal puis 2 - Validez

Paire n. 1 sur 78

Reecouter cette paire

1 - Quantifiez

++

+

0

-

--

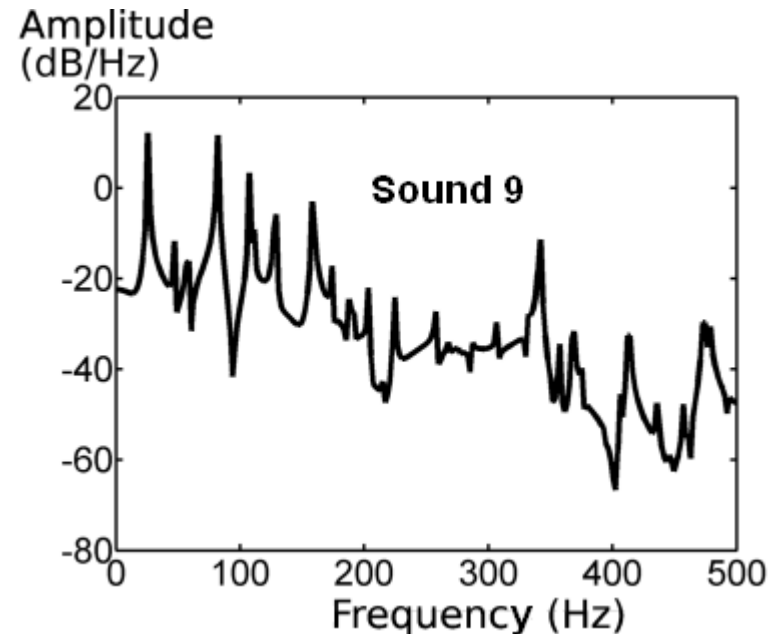
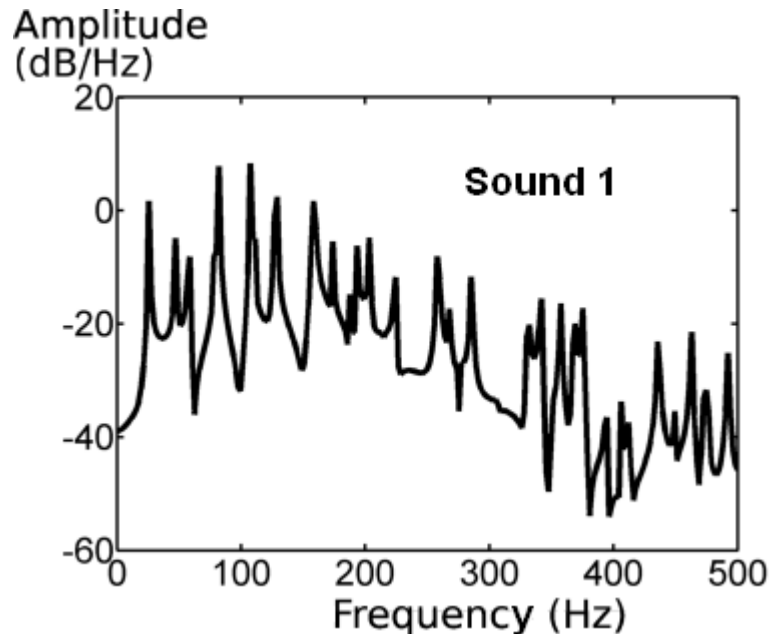
Tres
Semblables

Tres
Dissemblables

2 - Validez ici

2. Le système plaque/cavité : test perceptif 1

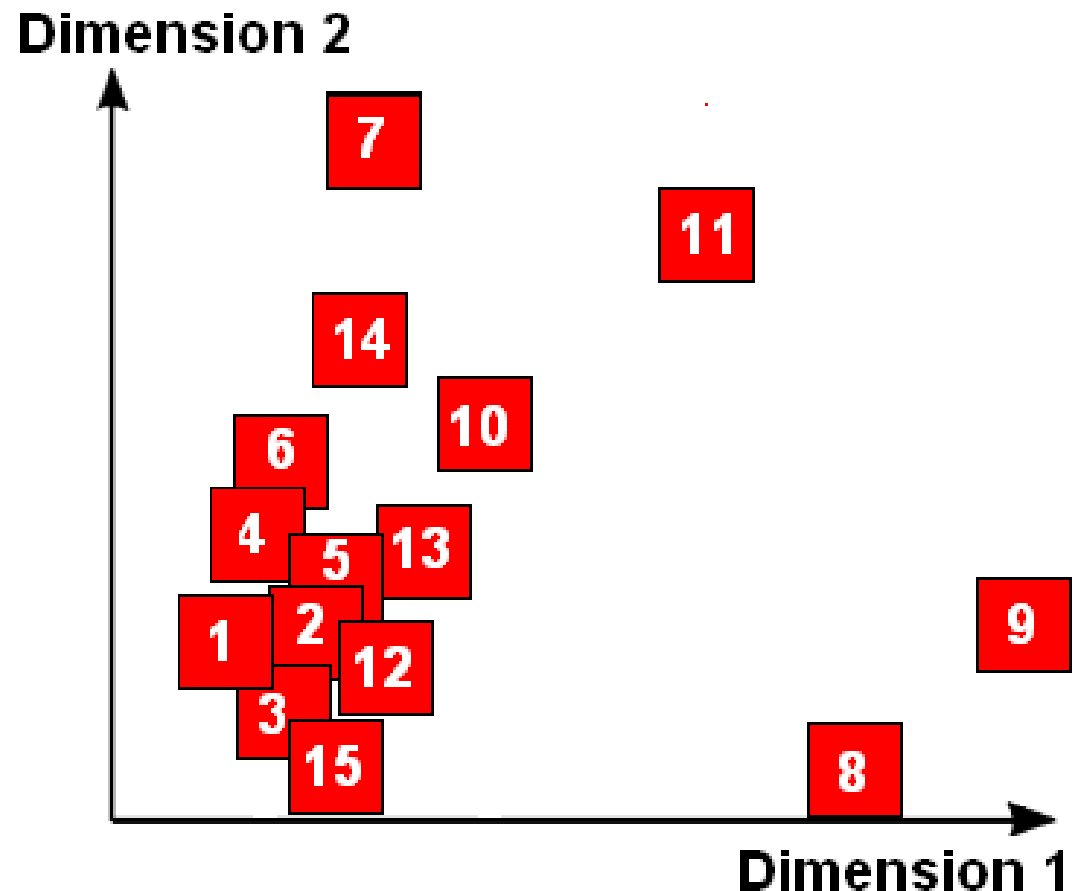
- Dimension 1 : caractère tonal/bruité



- Dimension 2 : brillance (corrélation avec le centre de gravité spectral)
- Dimension 3 : évolution temporelle (battements)

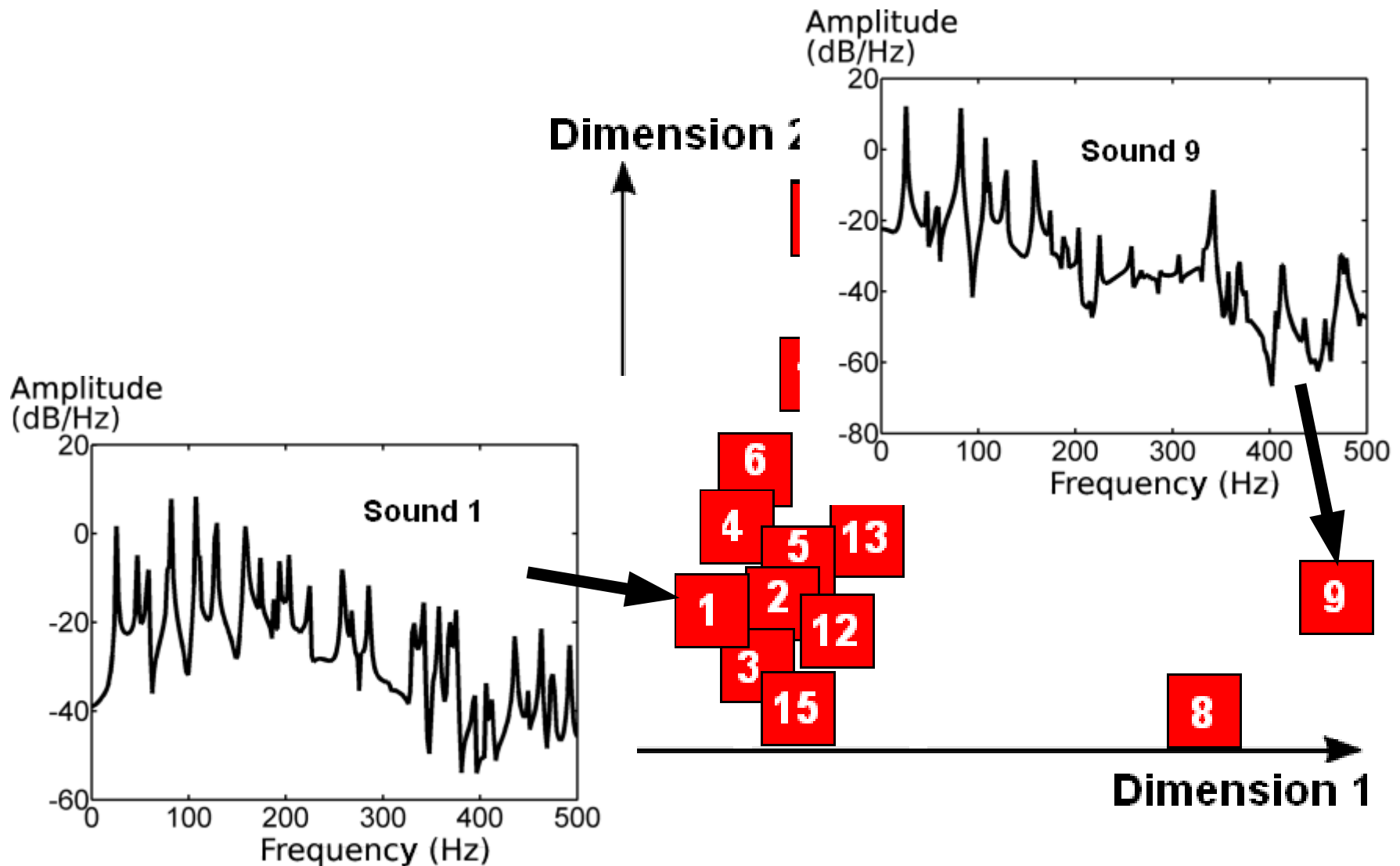
Le système plaque/cavité : test perceptif 1

- Dimension 1 : caractère tonal/bruité



Le système plaque/cavité : test perceptif 1

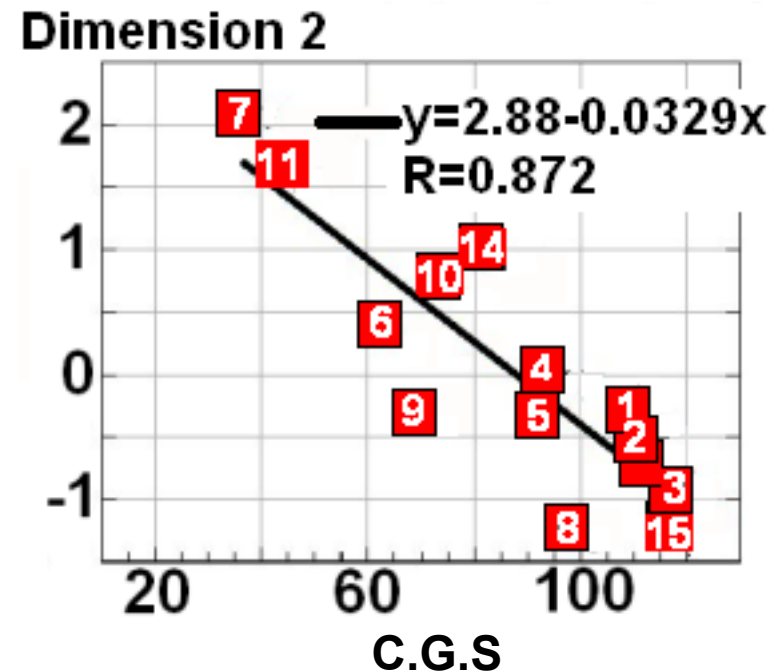
- Dimension 1 : caractère tonal/bruité



Le système plaque/cavité : test perceptif 1

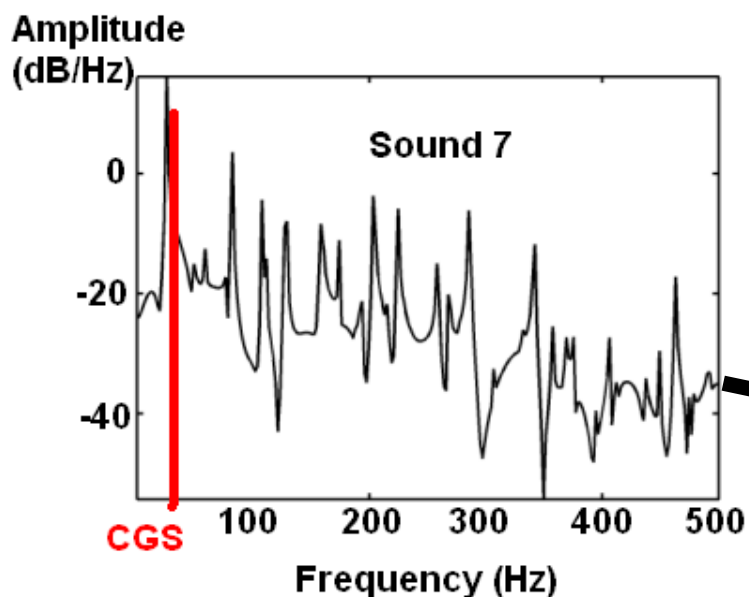
- Dimension 2 : brillance (centre de gravité spectral)

$$C.G.S. = \frac{\sum_{k=1}^N k A_k}{\sum_{k=1}^N A_k}$$

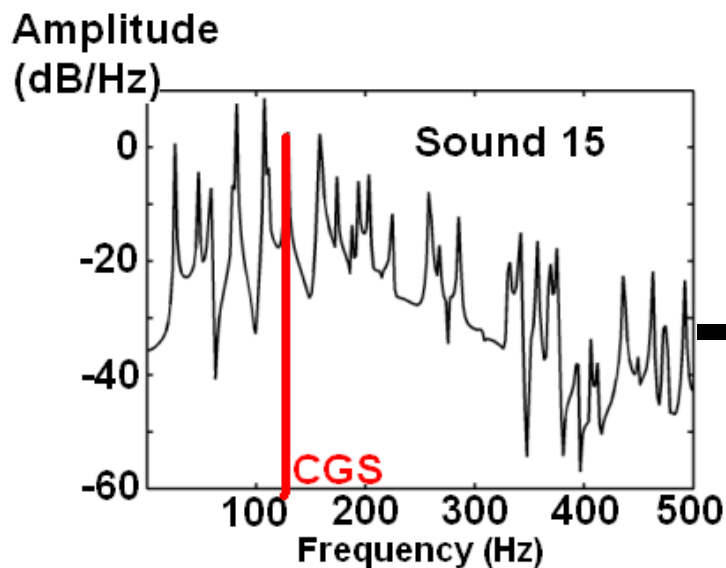


Le système plaque/cavité : test perceptif 1

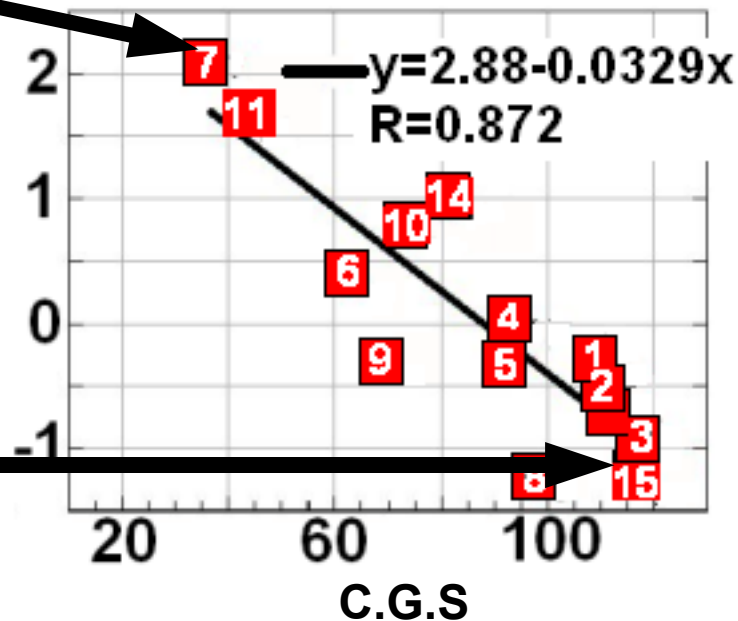
illiance (centre de gravité spectral)



$$\frac{k A_k}{1 A_k}$$

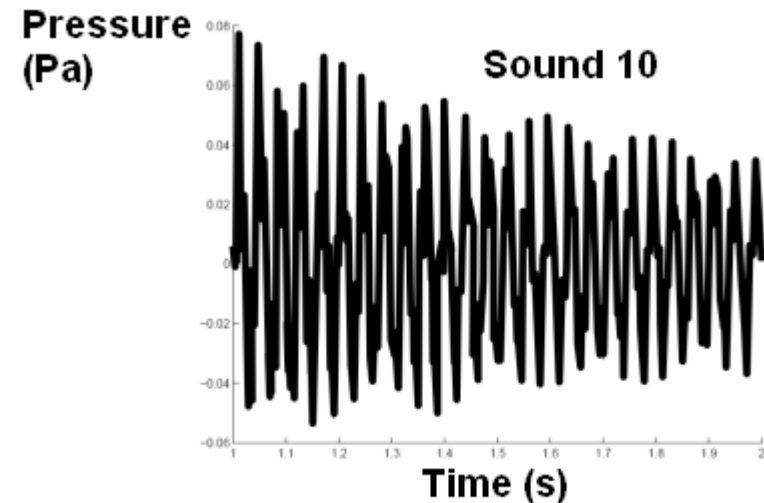
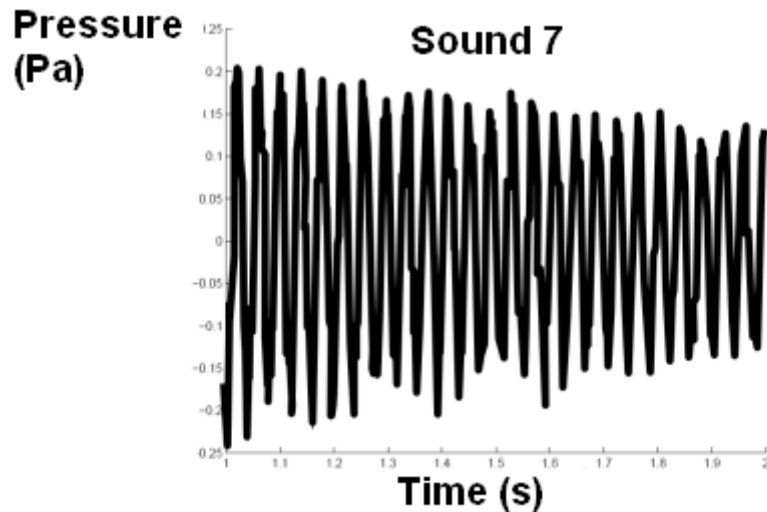


Dimension 2

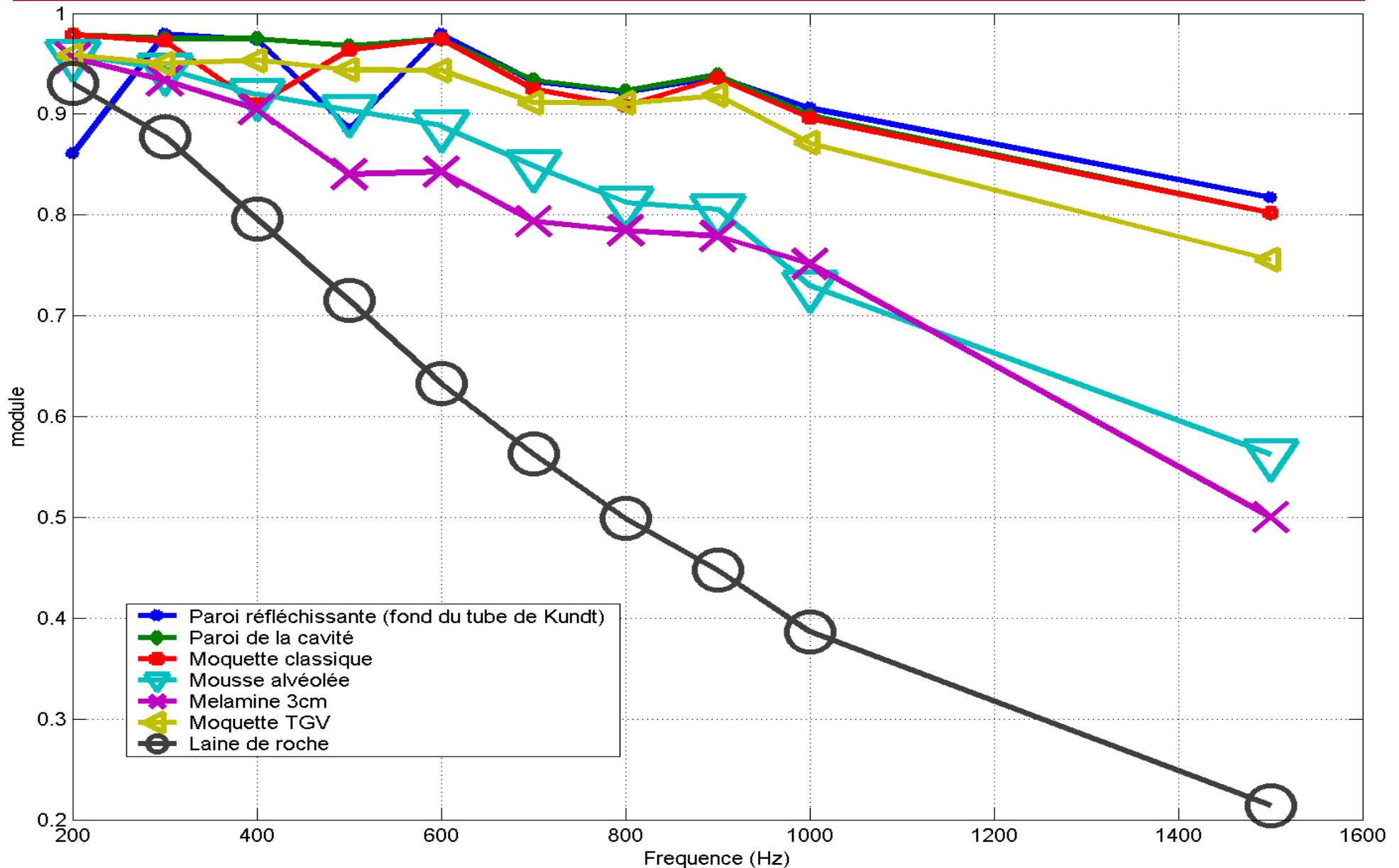


Le système plaque/cavité : test perceptif 1

- Dimension 3 : évolution temporelle (battements)



Le système plaque/cavité : matériaux test perceptif 2



Analyse Modale Operationnelle

- Hypothèses départ :
 - n modes,
 - excitation non connue,
 - excitation supposée de type bruit blanc stationnaire

- Methodes utilisees
 - Méthode LSCE
 - Méthode AR
 - Méthode SSI

Méthodes AMO

- Méthode LSCE : détermination des modes à partir de la corrélation entre signaux

$$\mathcal{R}_{ij}(k) = \sum_{l=1}^{2n} C'_{ijl} \exp(\lambda_l k T e)$$

- Méthode AR : détermination des modes à partir de l'autocorrélation des signaux

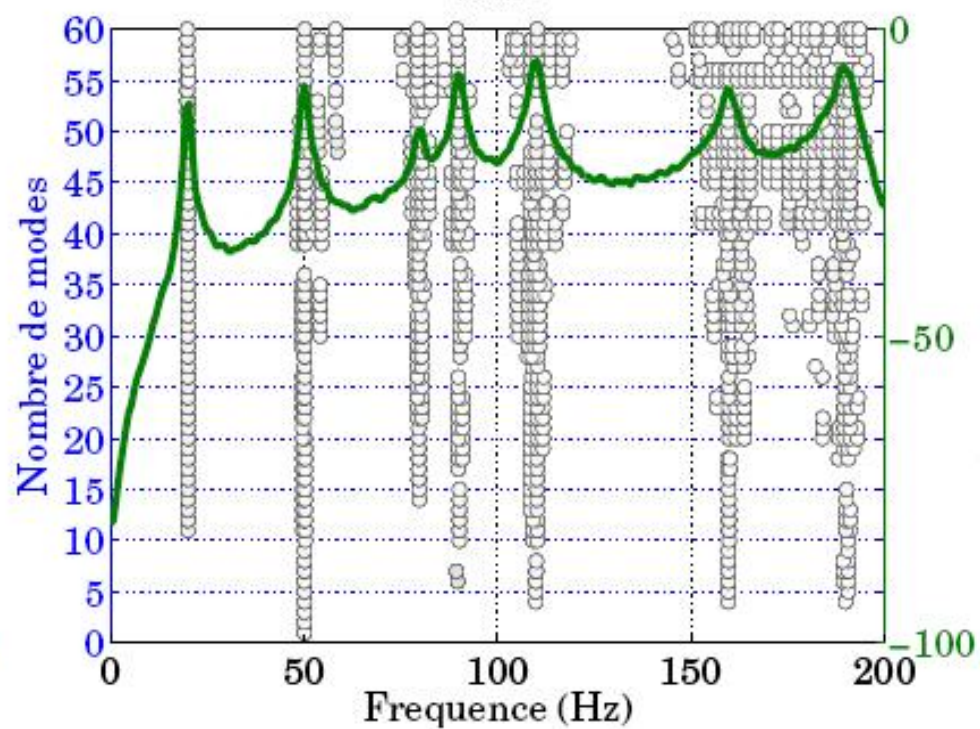
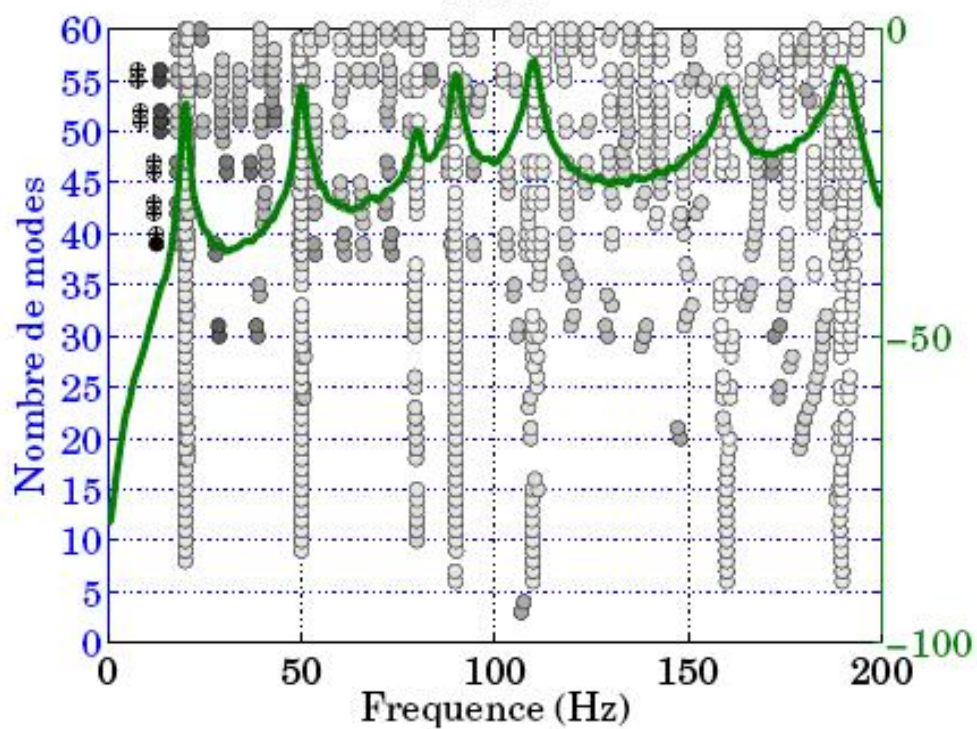
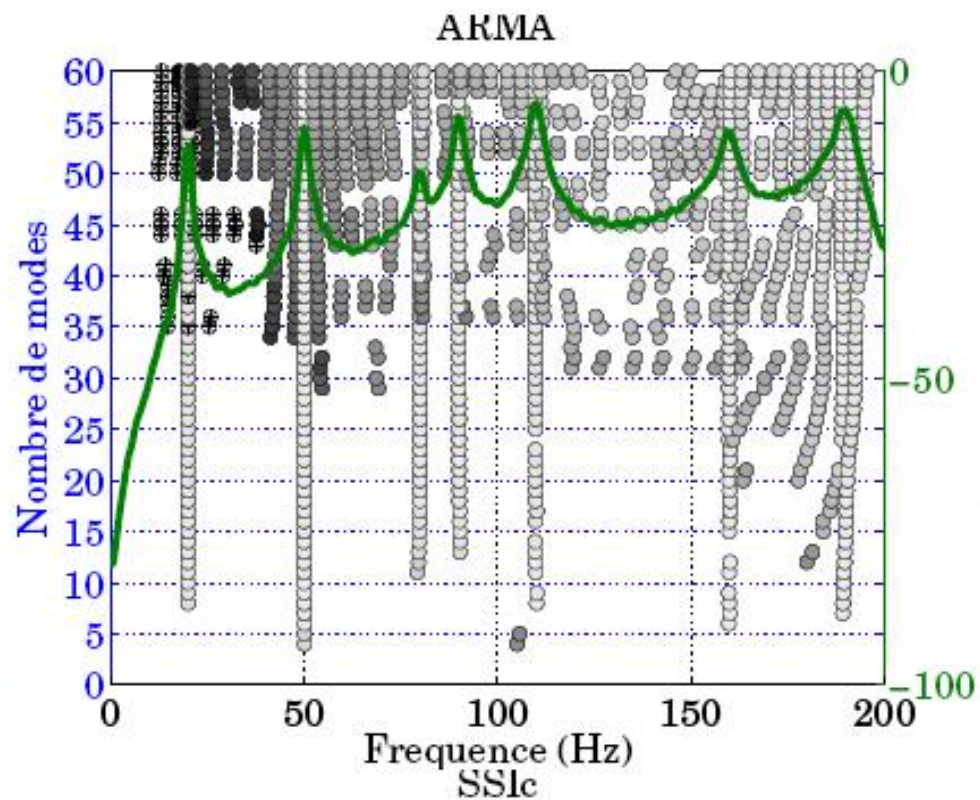
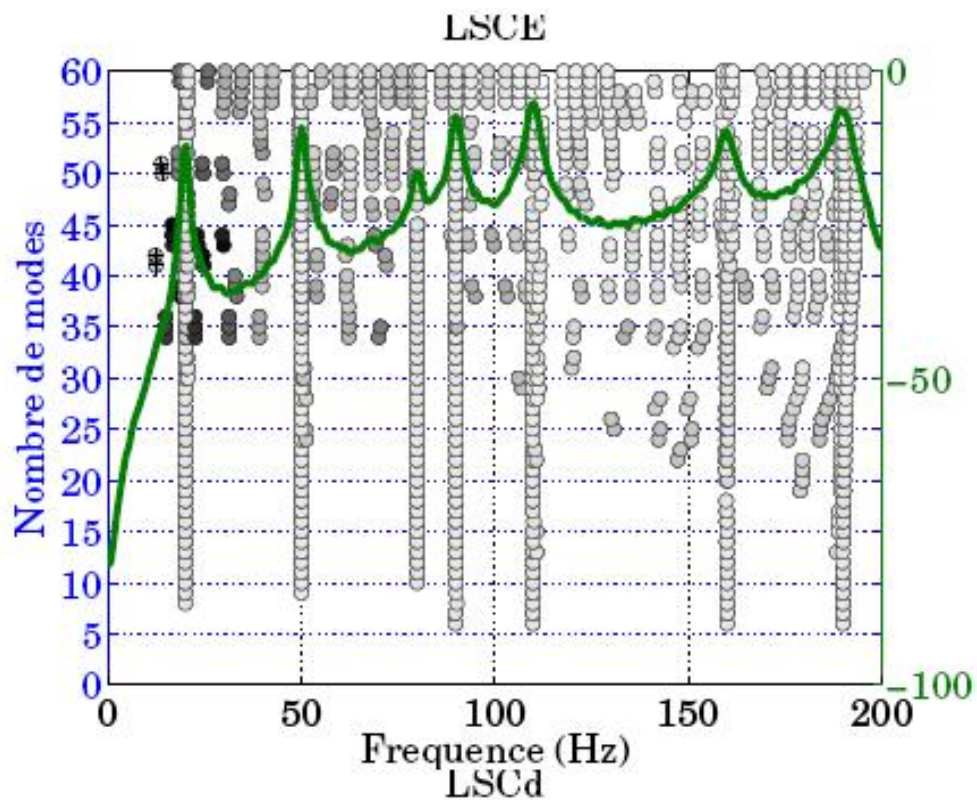
$$y(k) + \mathbf{A}_1 y(k-1) + \dots + \mathbf{A}_p y(k-p) = e(k).$$

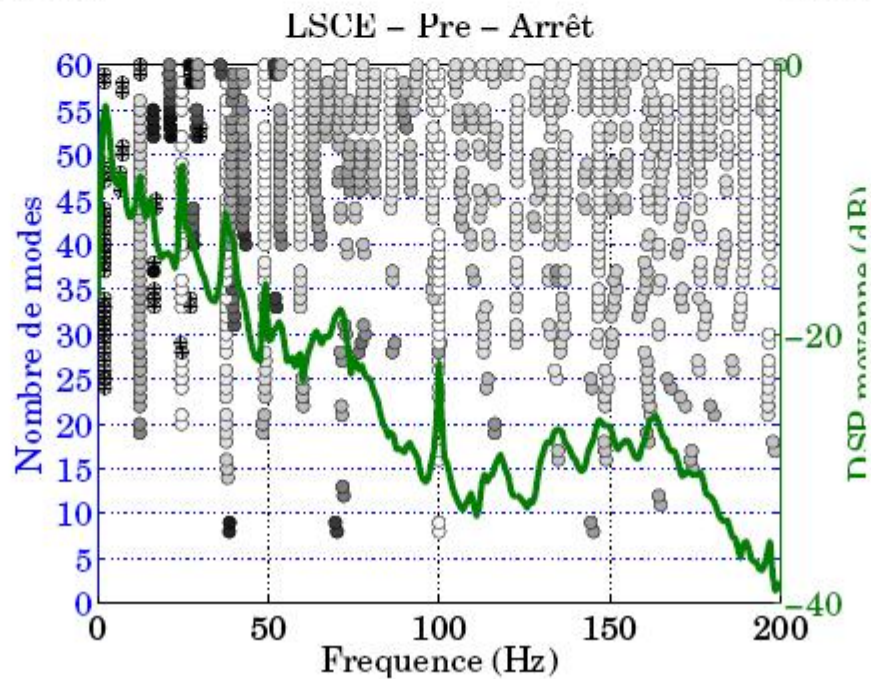
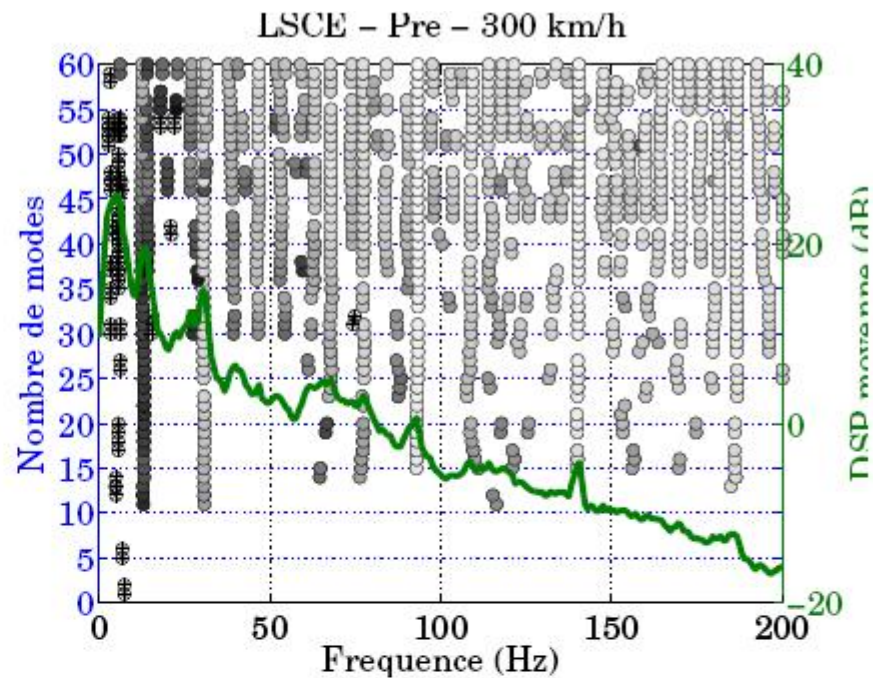
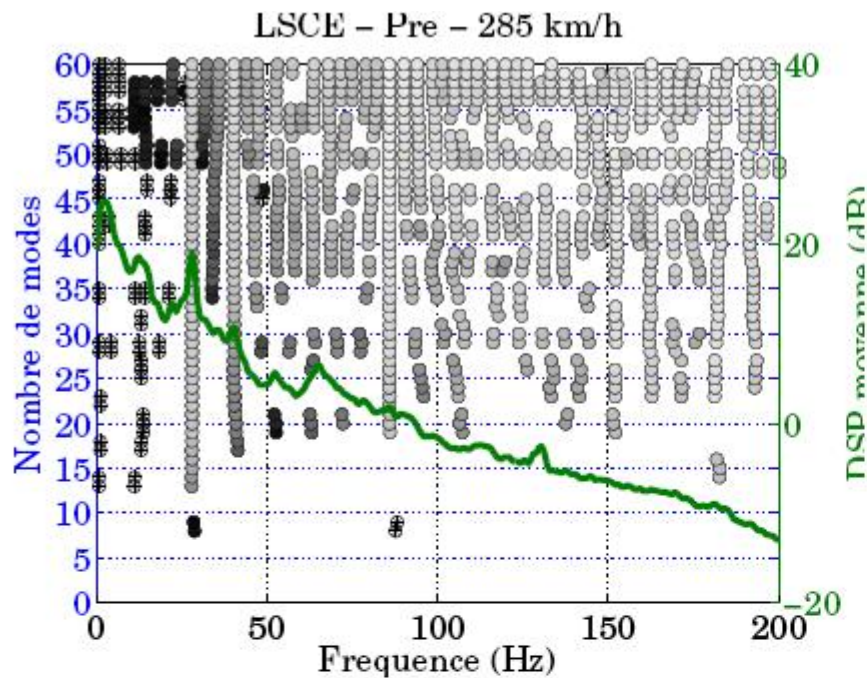
- Méthode SSI : détermination des modes à partir d'une représentation d'état du système

$$\begin{cases} v(k+1) & = \mathbf{A}v(k) + \mathbf{X}(k) \\ y(k) & = \mathbf{L}v(k) \end{cases}$$

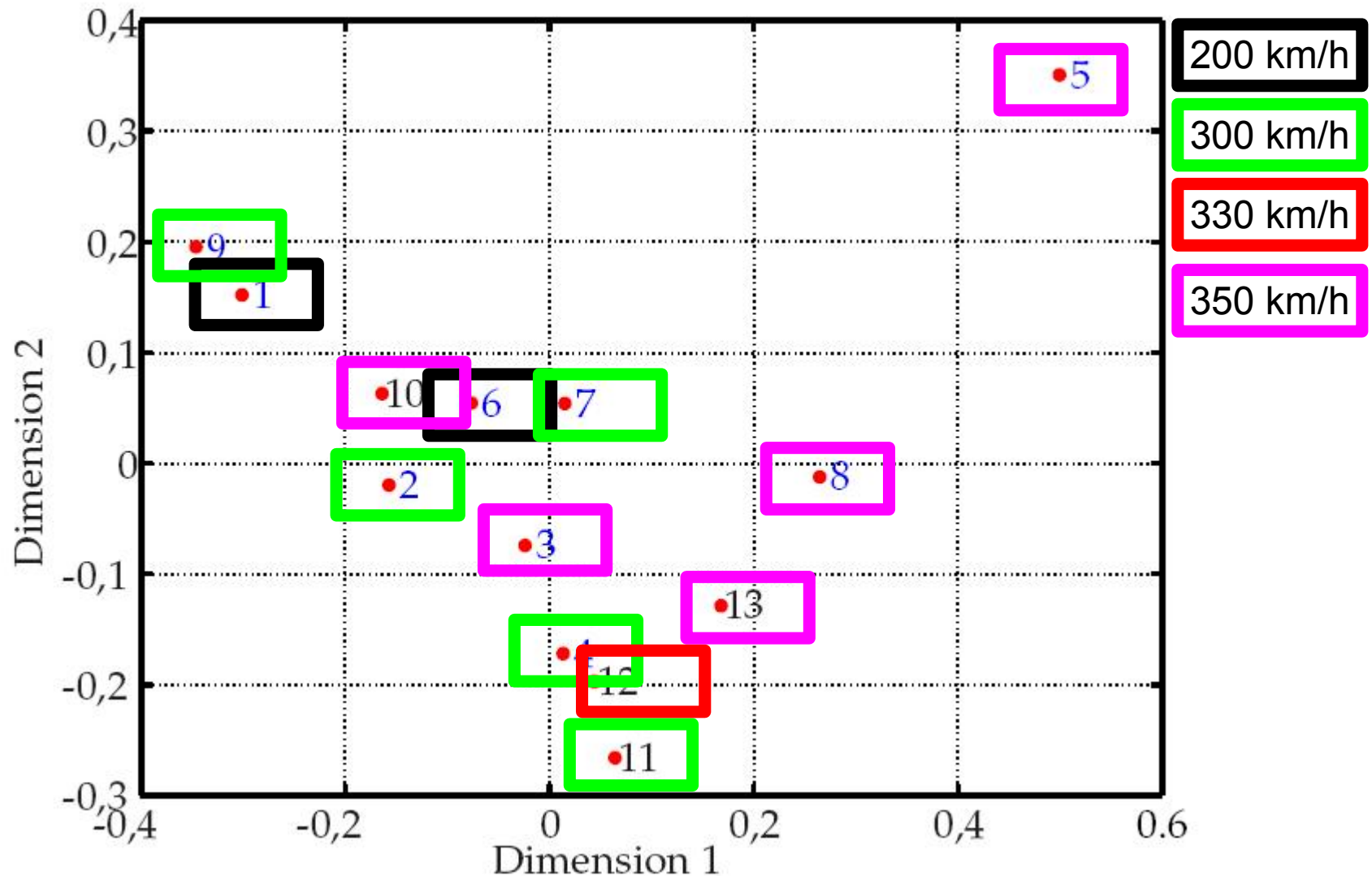
3. Le Train à Grande Vitesse : resynthèse

- Resynthèse d'un signal $s(t)$: (methode LSCE)
 - Détermination de n modes de la structure
 - Resynthèse de l'intercorrélation entre $s(t)$ et b.b.
 - Approximation de la DSP du signal $s(t)$
 - Ajout phase aléatoire
 - Calcul du signal temporel par transformée de Fourier inverse

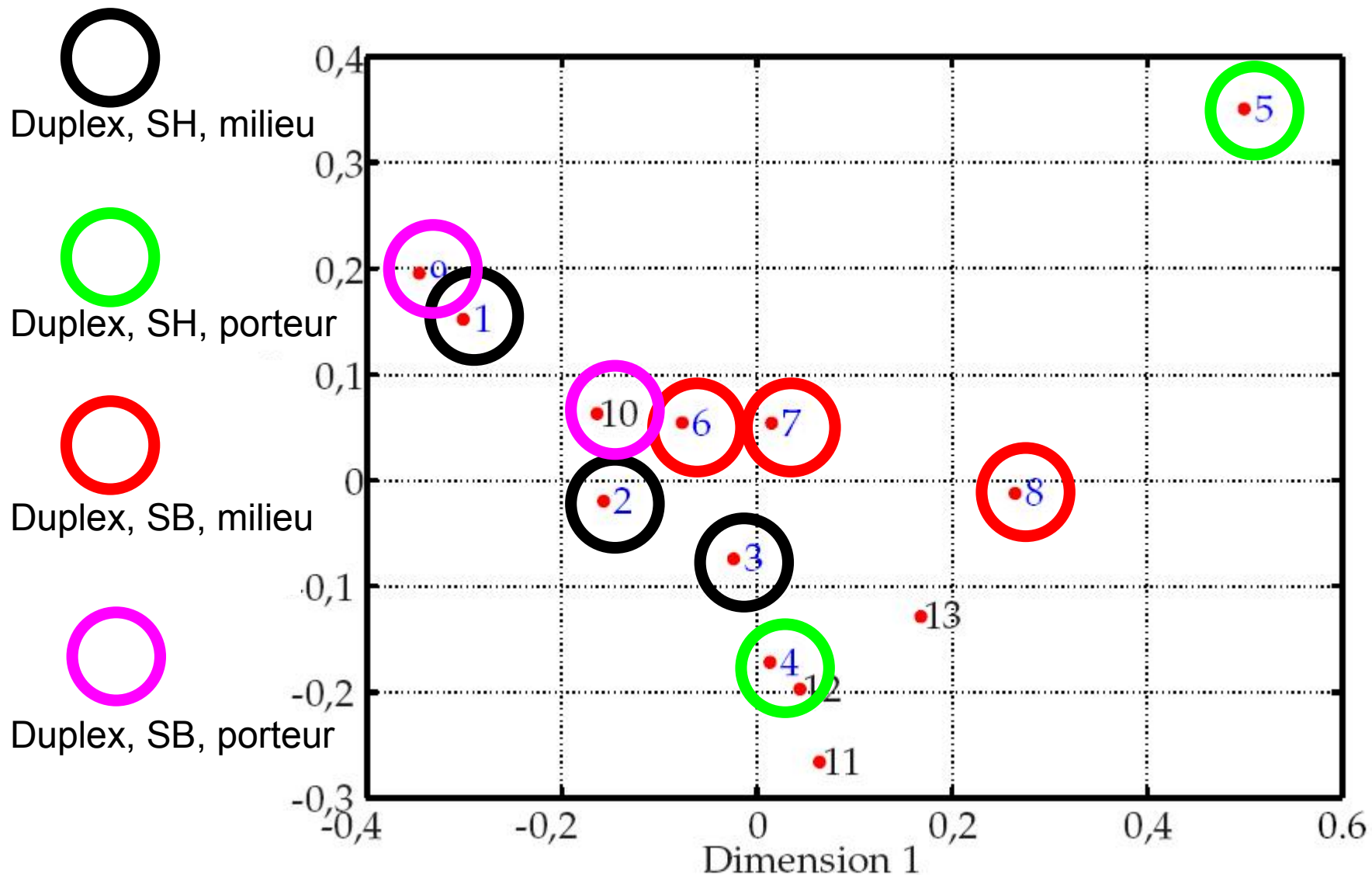




Le Train à Grande Vitesse : test perceptif



Le Train à Grande Vitesse : test perceptif



Resynthèse

1. On suppose que l'intercorrélation entre ces deux signaux s'écrit :

$$\mathcal{R}_{ij}(t) = \sum_{l=1}^{2N} C_l^{ij} \exp(s_l t) \quad (\text{IV.6})$$

où N est le nombre de modes de la structure et les coefficients s_l contiennent les informations (fréquences et amortissements) des modes de la structure. On suppose connus N , les s_l , $l = 1..2N$, et les valeurs de l'intercorrélation $\mathcal{R}_{ij}(kT_e)$ pour $t = kT_e$, $k = 1.. = K$, avec T_e la période d'échantillonnage et K un entier naturel "suffisamment" grand.

L'équation IV.6 écrite en $t = kT_e$ fournit alors un système linéaire dont les inconnues sont les coefficients C_l^{ij} . Si l'analyse modale a été faite avec une méthode LSCE, on peut sauter l'étape de calcul de ces coefficients car ils sont déjà calculés au cours de la méthode.

Resynthèse

2. On utilise les relations entre les densités spectrales et fonctions de transfert.

Soit H_{ij} la fonction de transfert entre les signaux σ_i et σ_j ; S_{ii} et S_{jj} les densités spectrales de σ_i et σ_j et S_{ij} la densité interspectrale de σ_i et σ_j . Alors, d'après [BEN80] :

$$S_{ii} = |H_{i/j}|^2 S_{jj}, \quad S_{ij} = H_{i/j} S_{jj}.$$

De plus, S_{ij} est la transformée de Fourier de $R_{ij}(t)$.

D'où :

$$S_{ii} = \frac{|S_{ij}|^2}{|S_{jj}|^2} \quad \text{et} \quad S_{jj} = \frac{|\mathcal{F}(\mathcal{R}_{ij})|^2}{|S_{jj}|^2} S_{jj}. \quad (\text{IV.7})$$

À partir de la représentation IV.6 et d'un signal $\sigma_j(t)$ connu, on déduit donc la densité spectrale de $\sigma_i(t)$.

Resynthèse

3. L'étape suivante consiste à choisir le signal de référence σ_j . Il y a deux choix possibles : soit σ_j est approché par un bruit blanc, soit σ_j est une donnée d'entrée.
À partir d'une estimation de S_{jj} et de la relation IV.7, on obtient une synthèse de la densité S_{ii} , notée \tilde{S}_{ii} . On note $\tilde{\sigma}_i(t)$ la synthèse du signal $\sigma_i(t)$.
4. Enfin, pour obtenir une représentation du signal $\sigma_i(t)$, on introduit une phase aléatoire ϕ entre 0 et 2π . La transformée de Fourier de $\tilde{\sigma}_i$, $\mathcal{F}(\tilde{\sigma}_i)$, est approchée par :

$$\mathcal{F}(\tilde{\sigma}_i) = \sqrt{\tilde{S}_{ii}} \times e^{i\phi}.$$

On obtient finalement $\tilde{\sigma}_i(t)$ par transformée de Fourier inverse.

Diagramme de stabilisation

Diagramme de stabilisation - methode LSCE

