

Isolement acoustique de parois aux basses fréquences : programmation d'outils prédictifs et confrontations expérimentales dans le cas de planchers solivés en bois

Antonin TRIBALEAU

Soutenance de thèse de doctorat en acoustique  
LAUM - CrittBois

Loïc BRANCHEREAU  
Frédéric DUBOIS  
Romain BRÉVART  
Jean-Francois DEÜ  
Jean-Luc KOUYOUUMJI  
Bruno BROUARD  
Olivier DAZEL  
Jean-Michel GÉNEVAUX  
Najat TAHANI

Chargé de recherche au CIRAD, HDR  
Professeur des Universités, CUGCE  
Ingénieur au CrittBois (Épinal)  
Professeur des Universités, CNAM-LMSSC  
Chercheur au FCBA-Efiaconsulting  
Maître de Conférences, LAUM  
Professeur des Universités, LAUM  
Professeur des Universités, LAUM  
Maître de Conférences, LAUM

Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Examineur  
Co-encadrant de thèse  
Co-encadrant de thèse  
Directeur de thèse  
Co-encadrant de thèse

# Contexte de la construction et du matériau bois

- Préoccupations internationales (écologie et environnement),
- Développement de systèmes constructifs **légers**.



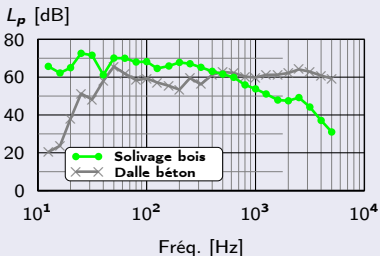
**Plancher solivé en bois**  
= une structure bois  
**répandue**

## Légèreté : avantage et inconvénient

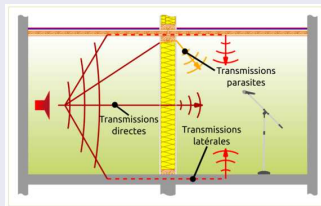
- 😊 Soulagement des structures porteuses,
- 😞 Sensibilité aux B.F. → logements collectifs et ERP.

## Sensibilité aux basses fréquences

Exemple aux bruits d'impacts :

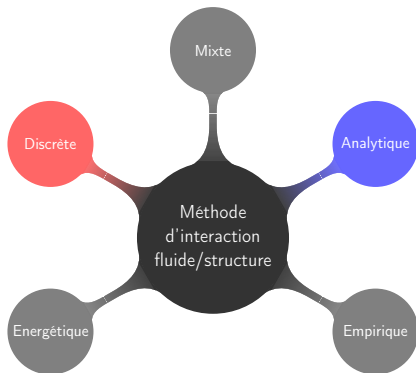


## Chemins de propagation mal maîtrisés



- Diversité des systèmes constructifs bois,
- Nombreux types d'assemblage et de jonctions.

# Contexte scientifique



## État de l'art :

- Rapport VINNOVA - *Acoustics in wooden buildings state of the art 2008*,
- Méthodes courantes de résolution en moyennes fréquences : SEA, matrice de transfert,
- Projet ACOUBOIS.

## Bibliographie en lien direct :

- **J.L. Kouyoumji** - *Caractérisation des parois courantes et des liaisons structurales pour la prévision de l'isolement acoustique d'une construction en bois* - Thèse soutenue en 2000 (Fr),
- **A. Bolmsvik** - *Structural-acoustic vibrations in wooden assemblies* - Thèse soutenue en 2013 (Sw),
- **K.A. Dickow** - *Prediction of Noise Transmission in Lightweight Building Structures* - Thèse en cours (Dk).

## Besoins :

- Modélisation du problème aux basses fréquences → méthode des éléments finis,
- Compréhension des transmissions latérales : caractérisation et modélisation des assemblages et jonctions,
- Développement de connecteurs innovants pour réduire les transmissions latérales.

# Objectifs et plan

## Plan

## Objectifs

0 Contexte et introduction

1 Modèle de sources acoustiques

2 Résolution de problèmes vibro-acoustiques des planchers

3 Modèle numérique d'une solive et d'un connecteur

4 Conclusions et perspectives

● Développer un moyen d'excitation des structures



● Mise en place d'un outil prédictif

● Utilisation de la méthode éléments finis

● Applications et études sur les planchers solivés bois

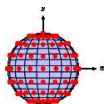


● Modélisation d'un assemblage courant



# Modèle de sources acoustiques

## Méthodologie



### Construction d'un champ diffus acoustique discret

- excitation homogène de la structure sans dépendre de l'angle d'incidence
- implémentation dans un code numérique comme source acoustique

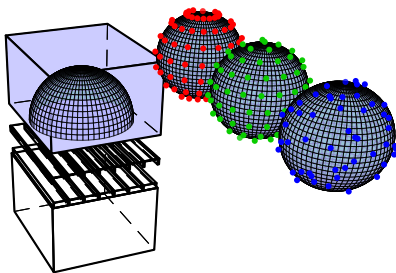
Champ diffus théorique : superposition d'ondes planes avec une équiprobabilité de directions et de phases aléatoires

- Quelle *technique* choisir ?
- Quelle méthode de *répartition spatiale* ?
- Quel *choix et critère de convergence* ?
- Combien de *sources* réparties et à quelles *fréquences* ?

# Modèle de sources acoustiques

Discrétisation des intensités acoustiques et répartitions des sources

## Du modèle théorique vers un modèle numérique



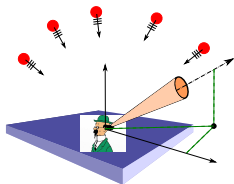
- 3 types de répartition testés de points sources : révolution, géodésique, aléatoire,
- Résultats exprimés comme le ratio  $\left(\frac{v_{num}}{v_{theo}}\right)$ ,
- Paramètres d'entrée : type de répartition, nombre de sources ( $N$ ), nombre de tirages, ratio  $d/\lambda$ .

# Modèle de sources acoustiques

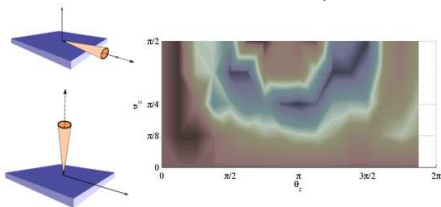
Critère de choix de la méthode de répartition des sources : cartographies

## Connaître la directivité du champ diffus numérique

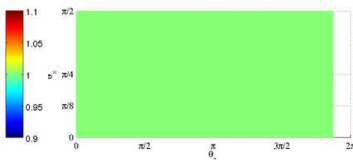
- Rotation de l'angle d'écoute des sources dans un hémisphère,
- Résultats par cartographies du ratio des intensités,  $I_{analyt} \approx 3.8 \cdot 10^{-3} \text{ W.m}^{-2}$  pour  $A = 1 \text{ Pa}$
- Couleur : écart / théorie.



Résultat numérique :



Objectif théorique :

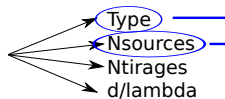


# Modèle de sources acoustiques

Critère de choix de la méthode de répartition des sources : cartographies

## Connaître la directivité du champ diffus numérique

- Test des paramètres : type de répartition, nombre de sources,
- Nombre de tirages : 100,
- $d/\lambda = 1.5$ .



Révolution



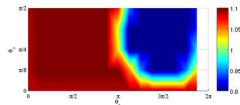
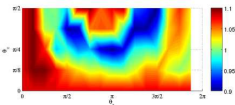
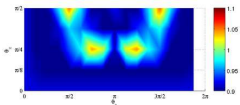
Géodésique



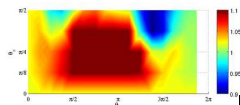
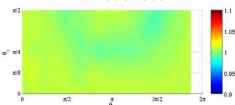
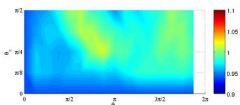
Aléatoire



14 sources :



114 sources :



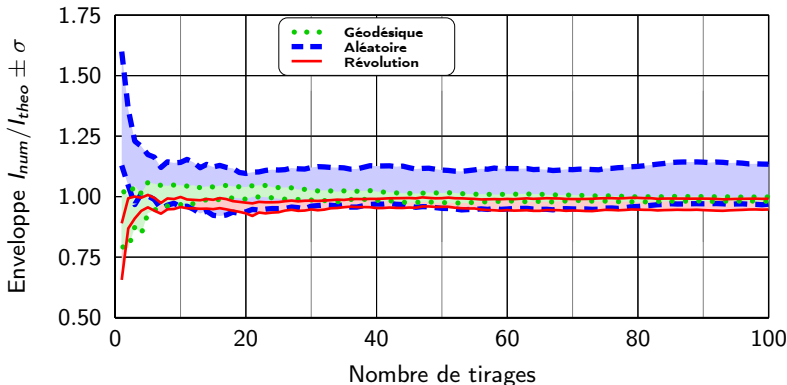
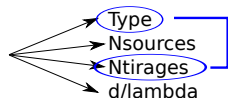


# Modèle de sources acoustiques

Critère de choix de la méthode de répartition des sources : écart-type de l'intensité moy.

## Connaître la convergence des cartographies

- Test des paramètres : Nombre de tirages, type de répartition
- Nombre de sources : 114,
- $d/\lambda = 1.5$ .

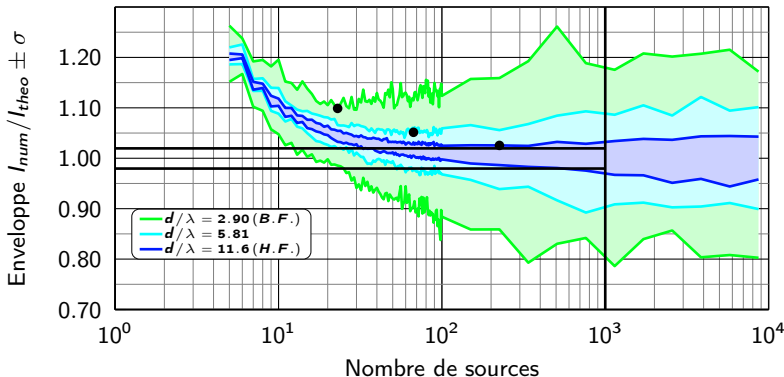
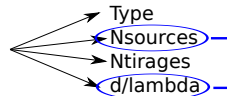


# Modèle de sources acoustiques

Construction de la fonction  $N(d/\lambda)$  : convergence de l'intensité fonction du nombre de sources

## Combien de sources réparties par la méthode géodésique ?

- Test des paramètres : Nombre de sources,  $d/\lambda$ ,
- Type de répartition : **géodésique**,
- Nombre de tirages : **100**.

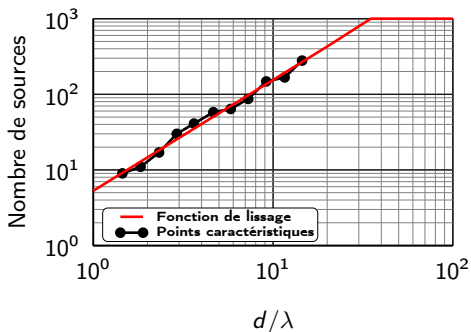
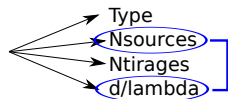


# Modèle de sources acoustiques

Construction de la fonction  $N(d/\lambda)$  : fonction associée aux points caractéristiques

## Une fonction $N(d/\lambda)$ associée au nombre optimal de sources ?

- Détermination des coordonnées des points caractéristiques,
- Estimation d'une fonction de lissage,
- Type de répartition : **géodésique**,
- 1 tirages pour 1 calcul.



- $f \rightarrow N$ ,
- Limitation à 1000 sources :  $\sigma_n < 2\%$ .

f	d	N sources	ratio l	$\sigma_n$
Hz	m	-	-	-
20	5	14	1.15	0.29
500	5	$\approx 1e+11$	1.00	0.04
500	5	1000	1.02	0.02

# Modèle de sources acoustiques

## Rappel du plan

### Plan

### Objectifs

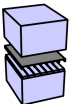
- 
- 0 Contexte et introduction
  - 1 Modèle de sources acoustiques
  - 2 Résolution de problèmes vibro-acoustiques des planchers
- 

- Développer un moyen d'excitation des structures
  - Mise en place d'un outil prédictif
  - Utilisation de la méthode éléments finis
  - Applications et études sur les planchers solivés bois
- 



# Résolution de problèmes vibro-acoustiques

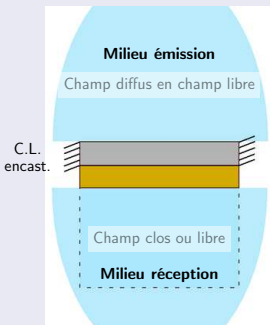
Problèmes d'interaction fluide / structure



Quels sont les différents types de problème en acoustique du bâtiment ?

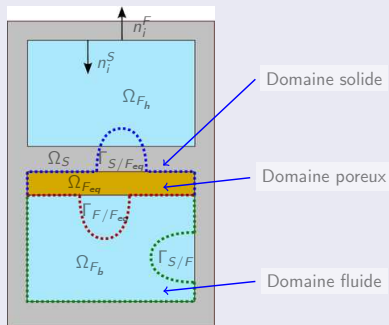
## Champ libre

- **Affaiblissement de parois**  
→ M.E.F. + F.I.



## Champ clos

- **Isolement entre locaux**  
→ M.E.F. et M.E.F. + F.I.



# Résolution de problèmes vibro-acoustiques

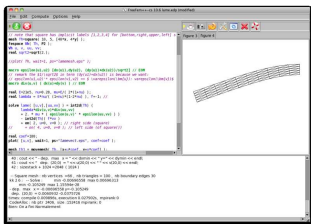
## Choix de la méthode de résolution

### Pourquoi la méthode des éléments finis ?

- Méthode adaptée aux basses fréquences - résonances distinctes,
- Liberté de la géométrie du problème,
- Méthodes SEA et matrices de transfert : non exploitable dans le régime modal.

### Pourquoi avoir choisi de travailler avec *FreeFem++* ?

- Logiciel libre, ouvert et en développement constant depuis 1987,
- Possibilités : résolution 2D et 3D, mailleur intégré, différentes fonctions d'interpolation, intégration numérique, parallélisation des calculs.
- Utilisation sous forme de scripts.



# Résolution de problèmes vibro-acoustiques

Problème couplé fluide / structure : fondements

## Formulation faible associée et intégration dans le code *Freefem++*

$$\begin{aligned}
 & \int_{\Omega_S} \sigma(u_i) : \epsilon(\delta u_i) \, d\Omega_S - \omega^2 \rho_s \int_{\Omega_S} \delta u_i u_i \, d\Omega_S \\
 & + \frac{1}{\tilde{\rho}_f} \int_{\Omega_F} \frac{\partial p}{\partial x_i} \frac{\partial \delta p}{\partial x_i} \, d\Omega_F - \frac{\omega^2}{\tilde{\rho}_f \tilde{c}_f^2} \int_{\Omega_F} p \delta p \, d\Omega_F \\
 & + \int_{\Gamma_{S/F}} (u_i \cdot n_i^F) \delta p \, d\Gamma + \int_{\Gamma_{S/F}} p (n_i^F \cdot \delta u_i) \, d\Gamma \\
 & + \int_{\Gamma_S} \delta u_i f_i \, d\Gamma = 0 \quad .
 \end{aligned}$$

Exemple concernant la partie structure :

```

1 // Formulation variationnelle
2 varf km([u1,u2,u3],[uk1,uk2,uk3]) =
3   int3d(Th)((A*e(u1,u2,u3))*e(uk1,uk2,uk3)) // K
4   - int3d(Th)(omega^2*rhos*(u1*uk1+u2*uk2+u3*uk3)) // M
5   + on(0,u1=0,u2=0,u3=0); // Conditions aux limites

```

# Résolution de problèmes vibro-acoustiques

Problème découplé F/S - affaiblissement

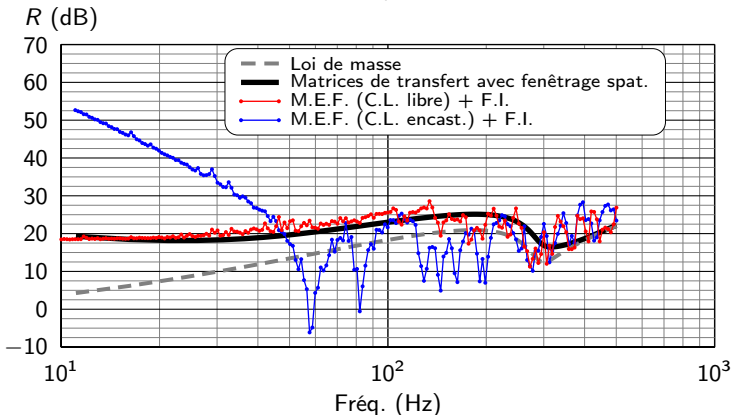
## Affaiblissement acoustique d'une plaque finie

M.E.F. + F.I.



- $R = 10 \log_{10}(W_i/W_t)$ ,
- Dimensions représentatives :  $4 \times 2.5 \text{ m}^2$ ,
- Excitation par champ diffus et rayonnement en champ libre,

$$p(\vec{r}, \omega) = \frac{i\omega\rho_0}{2\pi} \int_{S_0} \frac{\tilde{v}_n(\vec{r}_0) e^{-ikR}}{R} dS_0$$





# Résolution de problèmes vibro-acoustiques

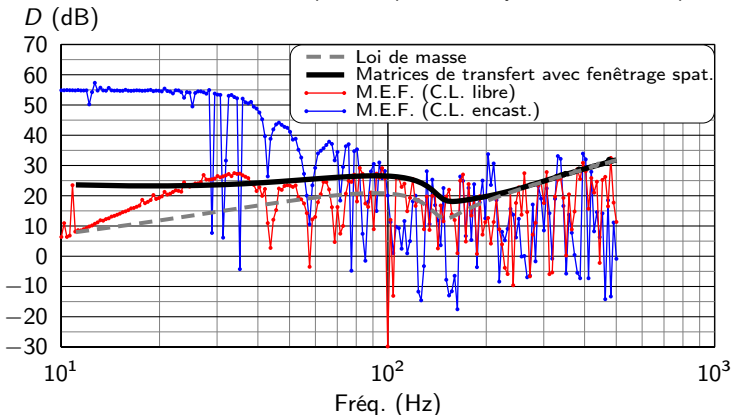
Problème couplé F/S : isolement

M.E.F.



## Isolement acoustique d'une plaque finie

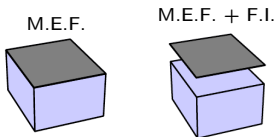
- $D = 10 \log_{10}(W_i/W_t)$ ,
- Dimensions identiques et  $h = 3$  m,
- Cavité aux parois parfaitement rigides,
- Excitation par champ diffus et rayonnement en champ clos.



# Résolution de problèmes vibro-acoustiques

Problème couplé et découplé F/S : deux approches de la problématique

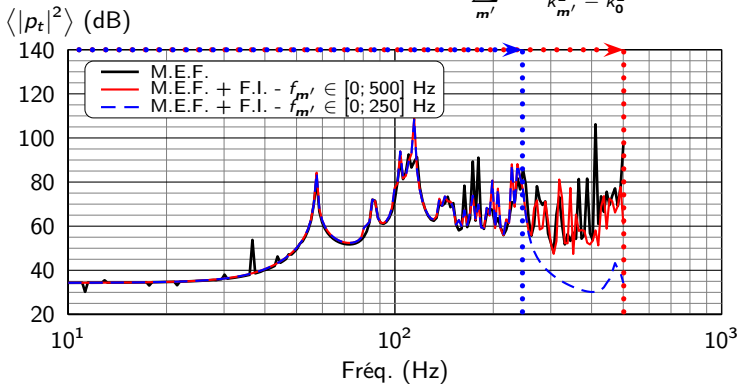
## Comparaison du rayonnement acoustique selon les deux méthodes de résolution



- Résultats sur la pression quadratique moyenne rayonnée,
- Excitation par onde plane normale,

$$\bullet \quad p_\omega(\vec{r}) = \iint_{\mathcal{S}} G_\omega(\vec{r}, \vec{r}_0) \hat{U}(\vec{r}_0) dV,$$

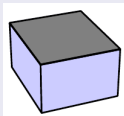
$$\bullet \quad G_\omega(\vec{r}, \vec{r}_0) = \sum_{m'}^{N'=250;500} \frac{\psi_{m'}(\vec{r}_0)}{k_{m'}^2 - k_0^2} \psi_{m'}(\vec{r}), \quad \vec{r} \in \Omega_F$$



# Résolution de problèmes vibro-acoustiques

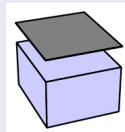
Du problème couplé au problème découplé et optimisé

## Problème couplé (M.E.F.)



- 😊 Adaptée à l'ensemble des types de couplage F/S (fort ou faible)
- 😞 Ressources importantes (mémoire + temps)
- 😞 Continuité des maillages à l'interface F/S

## Problème découplé (M.E.F. + F.I.)



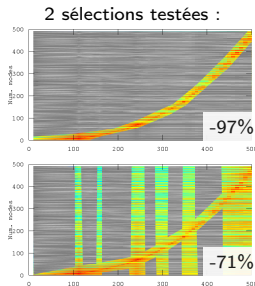
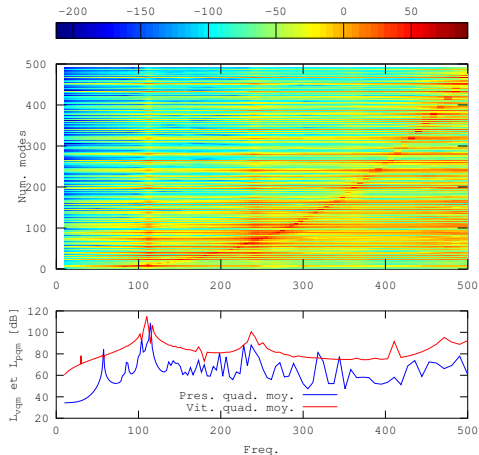
- 😊 Ressources en mémoire plus faibles
- 😊 Séparation des calculs F/S
- 😊 Troncature de la somme F.I.  
→ optimisation
- 😞 Calcul préalable des modes propres de cavité
- 😞 Ressources importantes en temps (accès DD)

# Résolution de problèmes vibro-acoustiques

Optimisation du calcul en champ clos : formulation intégrale réduite

## Matrice de la pression quadratique moyenne liée à la F.I.

$$G_{\omega}(\vec{r}, \vec{r}_0) = \sum_{m'}^{N'} \rightarrow \sum_{m''}^{N''}$$

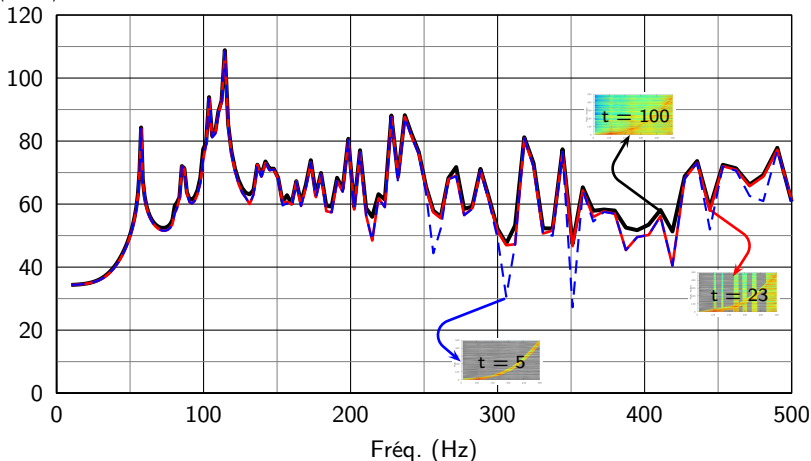


# Résolution de problèmes vibro-acoustiques

Optimisation du calcul en champ clos : formulation intégrale réduite

## Comparaison des résultats entre différentes sélections ?

$\langle |p_t|^2 \rangle$  (dB)



# Caractérisation expérimentale

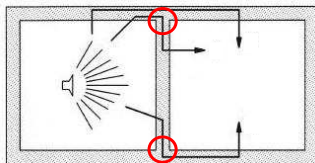
## Rappel du plan

### Plan

### Objectifs

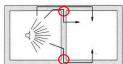
- 0 Contexte et introduction
- 1 Modèle de sources acoustiques
- 2 Résolution de problèmes vibro-acoustiques des planchers
- 3 Modèle numérique d'une solive et d'un connecteur

- Développer un moyen d'excitation des structures
- Mise en place d'un outil prédictif
- Utilisation de la méthode éléments finis
- Applications et études sur les planchers solivés bois
- Modélisation d'un assemblage courant



# Caractérisation expérimentale

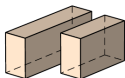
## Méthodologie



Solive et poutre

Connecteur

Caractérisation  
préalable

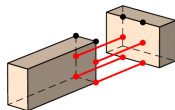


$E, \eta?$   
M.E.F.

Approche  
expérimentale



Caractérisation  
finale



$\tilde{k}_x$   
 $\tilde{k}_y?$   
 $\tilde{k}_z$

# Caractérisation expérimentale

Description du matériau et des solives – principe et choix du modèle mécanique



## Différentes lois de comportement selon l'échelle du matériau

Modèle	Matrice $C_{ijkl}$	Échelle
Orthotrope		
Isotrope transverse (Orthotrope cylindrique)		
Isotrope		

Quel comportement pour nos solives ?  
Quelle approche ? Eurocode 5 / D.Guitard



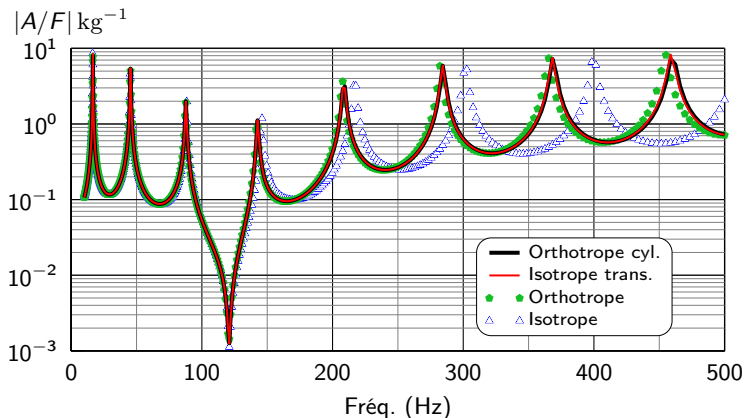


# Caractérisation expérimentale

Comportement de modèles numériques de solives

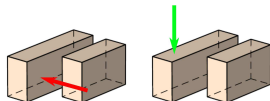
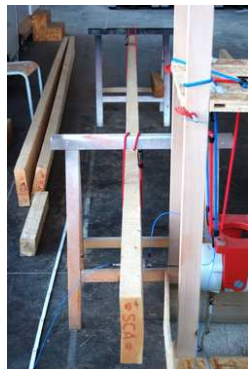
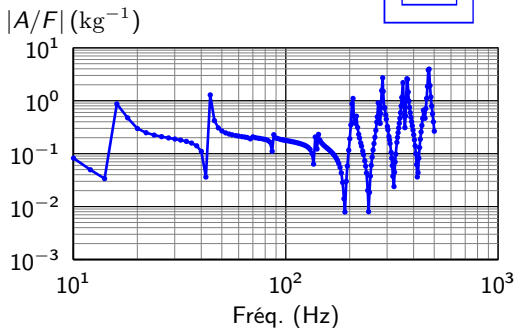
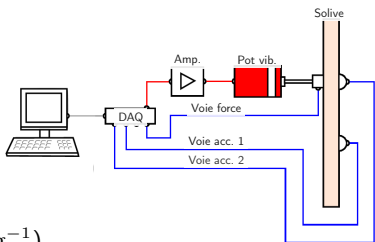


## Réponses en fréquence (flexion) des différentes lois de comportement



# Caractérisation expérimentale

Modélisation numérique d'une solive : protocole expérimental



# Caractérisation expérimentale

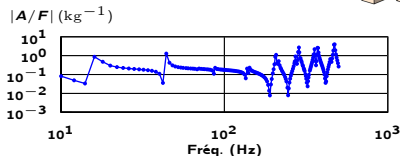
Modélisation numérique d'une solive : méthode de recalage



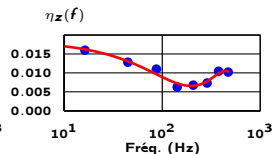
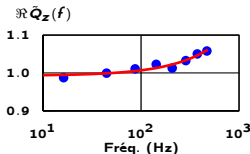
## Recalage par un ajustement dichotomique



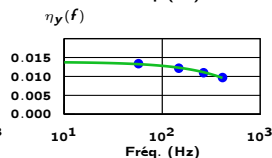
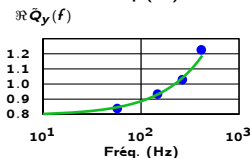
Relevé des fréquences propres et amortissements associés pour chaque orientation



Recalage du tenseur d'élasticité associé à  $\vec{z}$



Recalage du tenseur d'élasticité associé à  $\vec{y}$

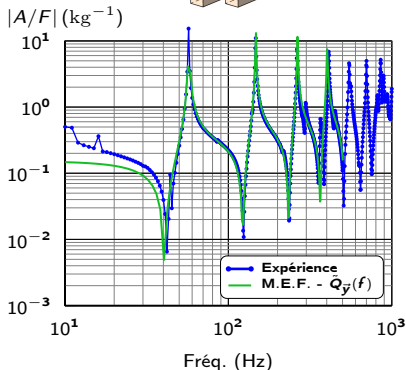
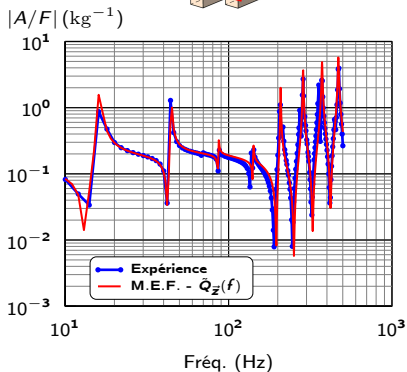


# Caractérisation expérimentale

Modélisation numérique d'une solive : comparaison des réponses  $|A/F|$

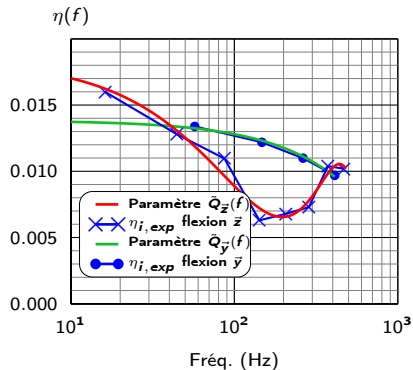
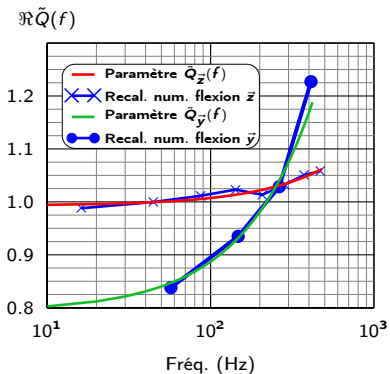


## Comparaison des réponses en fréquence des modèles numériques et expérimentaux



# Caractérisation expérimentale

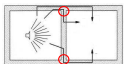
Modélisation numérique d'une solive : anisotropie et visco-élasticité



- Matériau bois = visco-élastique,
- Hypothèse d'évolution globale de la matrice de comportement,
- Anisotropie suivant le rayon de croissance.

# Caractérisation expérimentale

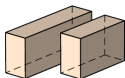
## Rappel de la méthodologie



Solive et poutre

Connecteur

Caractérisation  
préalable

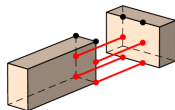


$E, \eta$   
connus  
M.E.F.

Approche  
expérimentale



Caractérisation  
finale



$\tilde{k}_x$   
 $\tilde{k}_y$ ?  
 $\tilde{k}_z$

# Caractérisation expérimentale

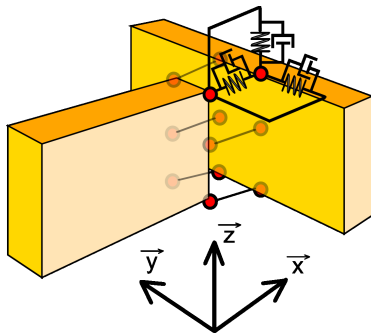
Modélisation numérique simplifiée d'un assemblage : sabot métallique

## Choix de la jonction et de son modèle mécanique équivalent

Sabot métallique : **connecteur courant**  
dans la jonction du solivage avec les  
parois verticales



Raideurs et dissipations selon les 3  
directions de l'espace :  $\vec{k}_x, \vec{k}_y, \vec{k}_z$



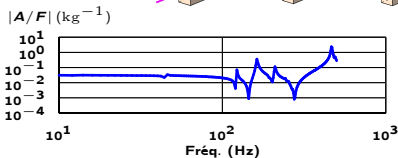
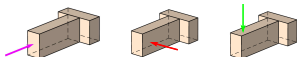
# Caractérisation expérimentale

Modélisation numérique d'une solive : méthode de recalage



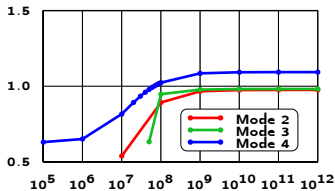
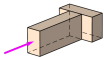
## Recalage par un ajustement dichotomique

Relevé des fréquences propres et amortissements associés pour chaque orientation



$f_{i,num.}(\tilde{k}_x)/f_{i,exp.}$

Recalage de la raideur complexe  $\tilde{k}_x$



$\Re[\tilde{k}_x]$  (N.m<sup>-1</sup>)

$\Re\tilde{k}_x = 3 \cdot 10^8$  N.m<sup>-1</sup>

$\tilde{k}_x = 3 \cdot 10^8 [1 + \eta_x i]$  N.m<sup>-1</sup>

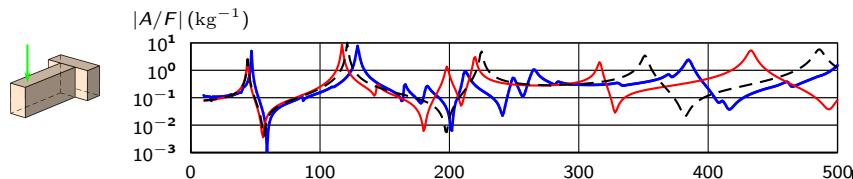
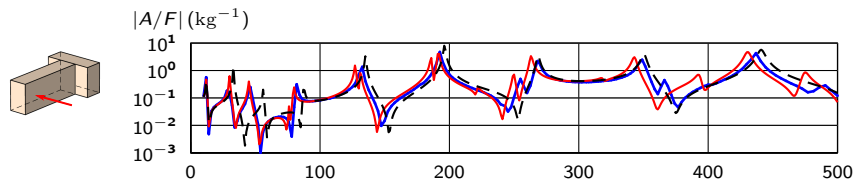
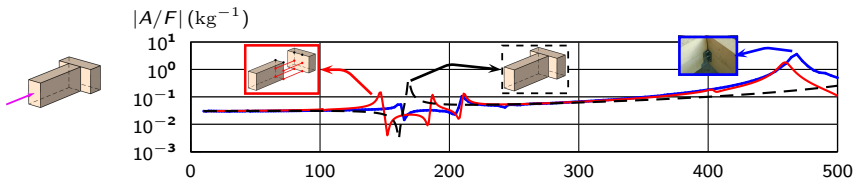
$\eta$ [%]		
	Exp.	1.5
$\eta_x$	Num. local	15
	Num. bois	1.1
	Num. global	1.5

Méthodologie identique pour les autres raideurs :  $\tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 1 \cdot 10^{10}$  N.m<sup>-1</sup>



# Caractérisation expérimentale

Modélisation numérique d'une solive : comparaison des réponses  $|A/F|$

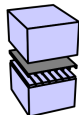


# Conclusions



→ Modélisation d'un champ diffus numérique discret

---



→ Développement d'une résolution mixte par M.E.F. et F.I.  
→ Calcul d'affaiblissement et d'isolement

---



→ Optimisation du calcul dans F.I.

---



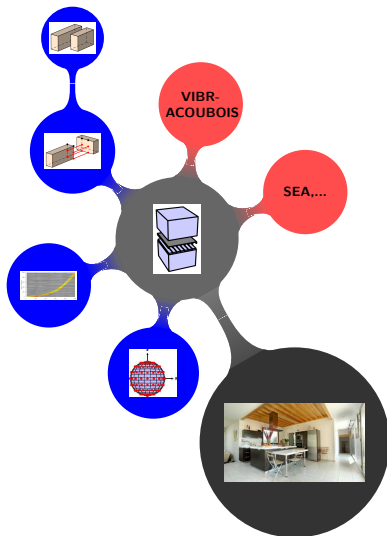
→ Caractérisation et modélisation une solive en bois massif

---



→ Développement d'une procédure de caractérisation d'un élément d'assemblage  
→ Modélisation d'un connecteur de type sabot métallique

# Perspectives



→ Intégration de l'ensemble des chemins de propagation,

→ Quantification des différents types de transmissions, en fonction de paramètres physiques et géométriques (masses, surfaces, angles...)

→ Vérification de la répétabilité des mesures sur le système assemblé,

→ **Thèse en cours de D. BLON** : modélisations à l'échelle du bâtiment.