

# Transmission acoustique des coques composites avec traitement poroélastique Modélisation et analyse de sensibilité

Jean-Loup Christen

Thèse de doctorat présentée le  
3 octobre 2016

— AIRBUS SAFRAN  
LAUNCHERS —

ÉCOLE  
**CENTRALE LYON**

# Projet CRIAQ

## Conception de traitements acoustiques pour les structures composites

- Aéronautique (confort de cabine d'avion)
- Spatial (lanceurs)
- Solutions "add-on" : structure conçue au préalable

## Partenaires

- ECL
- Université de Sherbrooke
- Airbus D& S
- Bombardier
- ...

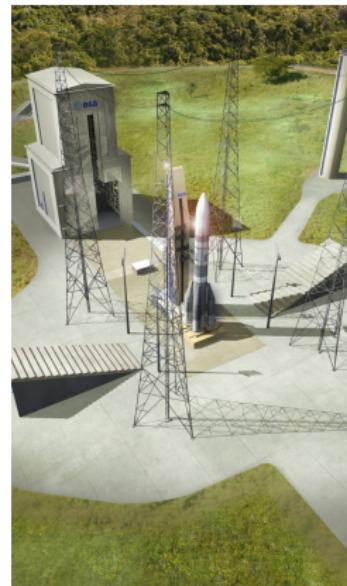
# Contexte industriel

## Ariane 6

- Accès indépendant à l'espace pour l'Europe
- Marché concurrentiel
- Réductions de coûts

## Enjeux vibroacoustique

- Décollage : champ réverbérant
- Charge utile "fragile"



# Contexte industriel

## Ariane 6

- Accès indépendant à l'espace pour l'Europe
- Marché concurrentiel
- Réductions de coûts

## Enjeux vibroacoustique

- Décollage : champ réverbérant
- Charge utile "fragile"



# Contexte industriel

## Coiffe du lanceur

- Composite (sandwich)
- Traitement acoustique (mousse)
- Géométrie complexe

## Incertitudes

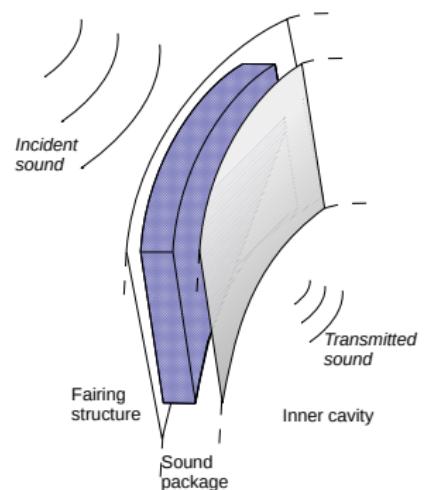
- Épistémiques : Marges de conception, mesure difficile
- Aléatoires : tolérances de fabrication



# Contexte industriel

## Modèle

- Composite (sandwich)
- Traitement acoustique (mousse)
- Géométrie simplifiée : plaque, cylindre



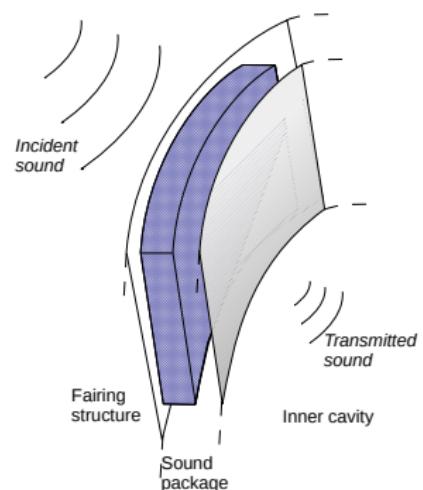
# Contexte industriel

## Modèle

- Composite (sandwich)
- Traitement acoustique (mousse)
- Géométrie simplifiée : plaque, cylindre

## Paramètres

- Matériaux : modules d'Young ...
- Poroélastiques : porosité, résistivité...
- Géométriques : épaisseurs



# Axes de recherche

## Modélisation

- Études de modèles existants (analytiques, SEA, WFE)
- Développement d'un modèle mixte analytique-WFE pour plaques et cylindres

# Axes de recherche

## Modélisation

- Études de modèles existants (analytiques, SEA, WFE)
- Développement d'un modèle mixte analytique-WFE pour plaques et cylindres

## Analyse de sensibilité

- Méthode FAST
- Modèles analytiques
- Code industriel
- Comparaison expérimentale

# Plan de la présentation

1. Modélisation
2. Analyse de sensibilité
3. Effet d'un traitement poroélastique
4. Conclusions





ÉCOLE  
CENTRALE LYON

Introduction  
Modélisation

Analyse de sensibilité  
Effet d'un traitement poroélastique  
Conclusions

État de l'art

TL de plaques par WFE  
Extension aux coques cylindriques

AIRBUS SAFRAN  
LAUNCHERS

# Table of Contents

## 1. Modélisation

- État de l'art
- TL de plaques par WFE
- Extension aux coques cylindriques

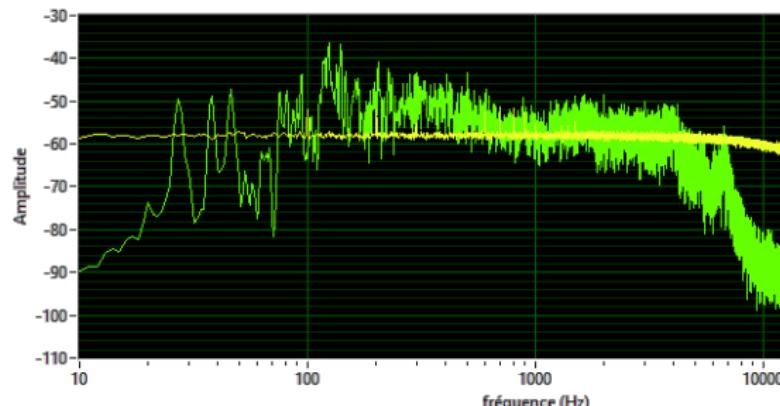
## 2. Analyse de sensibilité

## 3. Effet d'un traitement poroélastique

## 4. Conclusions



# Modèles pour la transmission acoustique

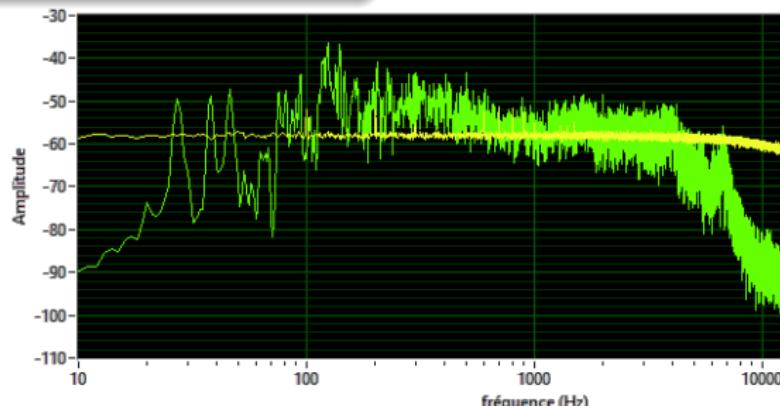


# Modèles pour la transmission acoustique

## Basses fréquences

Peu de modes, bien séparés

- Éléments finis
- Éléments de frontière  
(D'Amico 2011)



# Modèles pour la transmission acoustique

## Basses fréquences

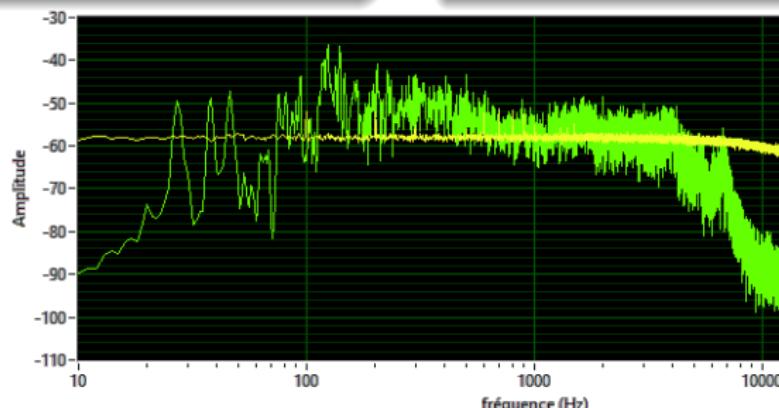
Peu de modes, bien séparés

- Éléments finis
- Éléments de frontière  
(D'Amico 2011)

## Hautes fréquences

Beaucoup de modes, superposés

- Modèles analytiques, TMM  
(Brouard 1995)
- SEA (Lyon & DeJong 1975)



# Modèles pour la transmission acoustique

## Basses fréquences

Peu de modes, bien séparés

- Éléments finis
- Éléments de frontière  
(D'Amico 2011)

## Hautes fréquences

Beaucoup de modes, superposés

- Modèles analytiques, TMM  
(Brouard 1995)
- SEA (Lyon & DeJong 1975)

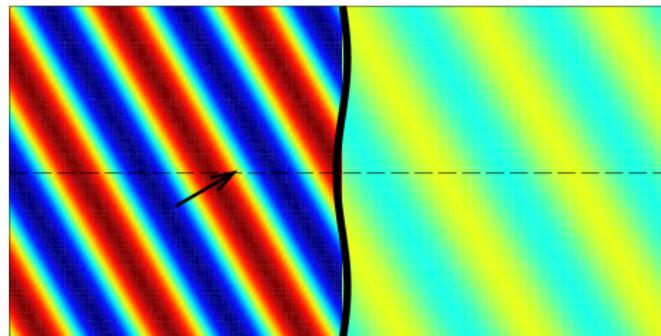
## Moyennes fréquences

Trop de modes pour BF, trop distincts pour HF

- Approches mixtes : SEA+EF, SEA+WFE (Chronopoulos 2012)
- Relaxation d'hypothèses : SEA-like (de Rochambeau 2010)

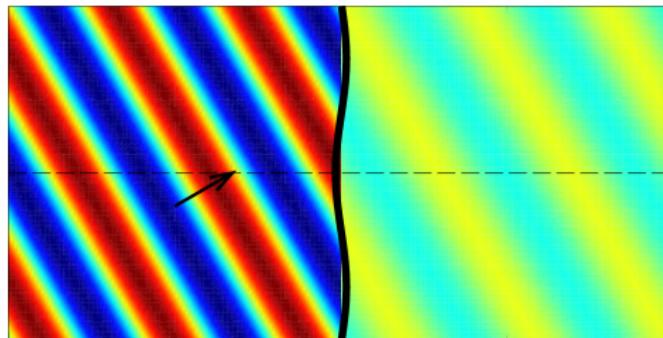
# Système étudié

- Plaque stratifiée infinie → Hautes fréquences



## Système étudié

- Plaque stratifiée infinie → Hautes fréquences
- Impactées par une onde plane d'amplitude connue





ÉCOLE  
CENTRALE LYON

Introduction  
Modélisation

Analyse de sensibilité  
Effet d'un traitement poroélastique  
Conclusions

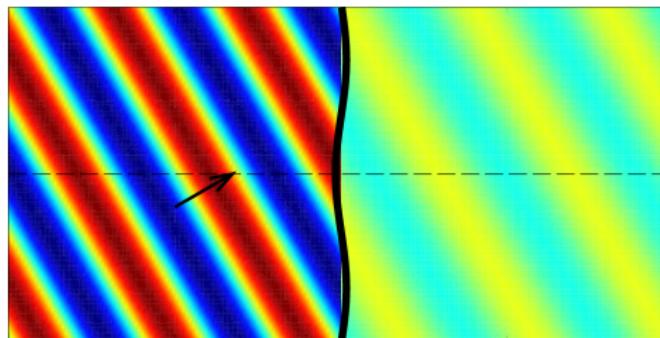
État de l'art

TL de plaques par WFE  
Extension aux coques cylindriques

AIRBUS SAFRAN  
LAUNCHERS

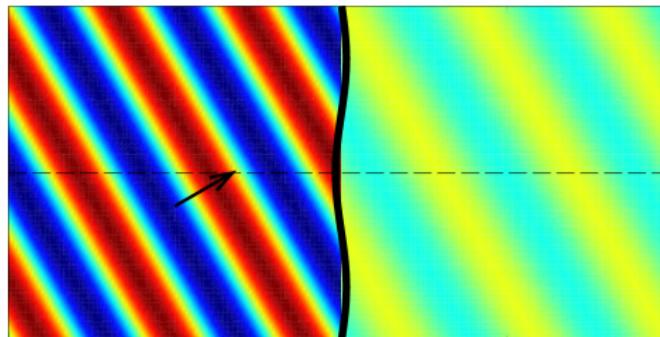
## Système étudié

- Plaque stratifiée infinie → Hautes fréquences
- Impactées par une onde plane d'amplitude connue
- Amplitudes réfléchie et transmise inconnues



## Système étudié

- Plaque stratifiée infinie → Hautes fréquences
- Impactées par une onde plane d'amplitude connue
- Amplitudes réfléchie et transmise inconnues
- $TL = -20 \log_{10}(p_T/p_I)$



## Système étudié

- Plaque stratifiée infinie → Hautes fréquences
- Impactées par une onde plane d'amplitude connue
- Amplitudes réfléchie et transmise inconnues
- $TL = -20 \log_{10}(p_T/p_I)$

### État de l'art

- Monocouche : cas classique
- Multicouches : matrices de transfert (Brouard 1995, Allard & Atalla 2009)
- Matrices de transfert simplifiées (Hu 2010) pour la suite

# Modélisation : Méthode des matrices de transfert simplifiée

## Principe

- Plaques
- Poreux : fluide équivalent
- Variables d'état : pression et vitesse normale





# Modélisation : Méthode des matrices de transfert simplifiée

## Principe

- Plaques
- Poreux : fluide équivalent
- Variables d'état : pression et vitesse normale



## Relation entre champs incidents et transmis

- Une matrice par couche
- $$\begin{pmatrix} p_i \\ v_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_t \\ v_t \end{pmatrix} = \prod_{k=1}^n T_k \begin{pmatrix} p_t \\ v_t \end{pmatrix}$$



ÉCOLE  
CENTRALE LYON

# Plaque

## Matrice de transfert

- Pressions de part et d'autre
- Continuité des vitesses normales

$$T_p = \begin{pmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$



## Impédance d'une plaque mince

### Kirchhoff-Love

$$Z = \frac{1}{i\omega} (Dk^4 - \omega^2 m)$$



ÉCOLE  
CENTRALE LYON

# Plaque

## Matrice de transfert

- Pressions de part et d'autre
- Continuité des vitesses normales

$$T_p = \begin{pmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$



Impédance d'une plaque souple : loi de masse

Raideur négligeable

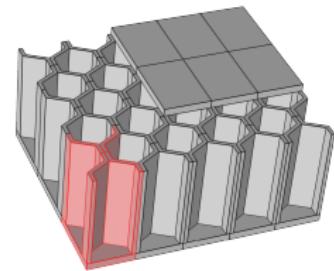
$$Z = i\omega m$$

# Plaque

## Matrice de transfert

- Pressions de part et d'autre
- Continuité des vitesses normales

$$T_p = \begin{pmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$



## Impédance d'une plaque sandwich

Terme de cisaillement (Mead, 1978, Narayanan & Shanbhag, 1982)

$$Z = \frac{1}{i\omega(k^2 + g)} (D_t k^6 + g(D_t + B)k^4 - m\omega^2 k^2 - mg\omega^2)$$

$D_t$  : flexion des peaux,  $B$  : flexion globale,  $g$  : cisaillement



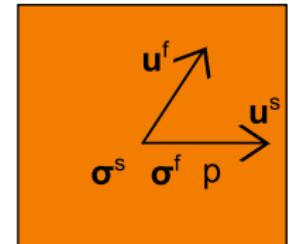
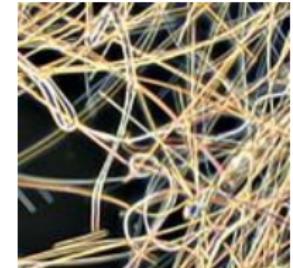
ÉCOLE  
CENTRALE LYON

# Fluide ou poreux

## Fluide

- Propagation d'onde de pression

$$T_f = \begin{pmatrix} \cos(k_z h) & \frac{i\omega\rho}{k_z} \sin(k_z h) \\ \frac{ik_z}{\omega\rho} \sin(k_z h) & \cos(k_z h) \end{pmatrix}$$





ÉCOLE  
CENTRALE LYON

# Fluide ou poreux

## Fluide

- Propagation d'onde de pression

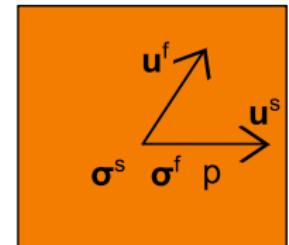
$$T_f = \begin{pmatrix} \cos(k_z h) & \frac{i\omega\rho}{k_z} \sin(k_z h) \\ \frac{ik_z}{\omega\rho} \sin(k_z h) & \cos(k_z h) \end{pmatrix}$$



## Poreux

- Squelette infiniment souple ou rigide
- Densité, compressibilité fonctions de  $\omega$

$$T_p = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \varphi \end{pmatrix} \tilde{T}_f \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/\varphi \end{pmatrix}$$



# Calcul de TL

## Transparence acoustique

- Post-traitement de la matrice de transfert
- $\tau = \frac{1}{2} |T_{11} + YT_{12} + T_{21}/Y + T_{22}|^{-2}$
- $Y = \cos \theta / \rho_0 c_0$  admittance du fluide.

# Calcul de TL

## Transparence acoustique

- Post-traitement de la matrice de transfert
- $\tau = \frac{1}{2} |T_{11} + YT_{12} + T_{21}/Y + T_{22}|^{-2}$
- $Y = \cos \theta / \rho_0 c_0$  admittance du fluide.

## Champ diffus

- Intégration sur les angles d'incidence  $\theta$  et les direction  $\varphi$
- $\tau_d = \frac{1}{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \tau \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi$

# Calcul de TL

## Transparence acoustique

- Post-traitement de la matrice de transfert
- $\tau = \frac{1}{2} |T_{11} + YT_{12} + T_{21}/Y + T_{22}|^{-2}$
- $Y = \cos \theta / \rho_0 c_0$  admittance du fluide.

## Champ diffus

- Intégration sur les angles d'incidence  $\theta$  et les direction  $\varphi$
- $\tau_d = \frac{1}{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \tau \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi$

## TL

- $TL = -10 \log_{10} \tau$



ÉCOLE  
CENTRALE LYON

Introduction  
Modélisation

Analyse de sensibilité  
Effet d'un traitement poroélastique  
Conclusions

État de l'art

TL de plaques par WFE

Extension aux coques cylindriques

AIRBUS SAFRAN  
LAUNCHERS

# Table of Contents

## 1. Modélisation

- État de l'art
- TL de plaques par WFE
- Extension aux coques cylindriques

## 2. Analyse de sensibilité

## 3. Effet d'un traitement poroélastique

## 4. Conclusions





ÉCOLE  
CENTRALE LYON

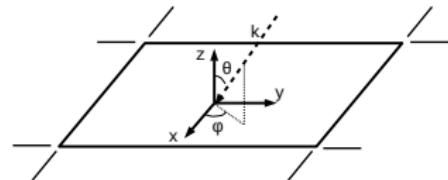
# Équations de base

## Air

- Onde plane

$$p_i = \exp(i(k_x x + k_y y + k_z z))$$

- $k_x, k_y$  nombres d'ondes constants



# Équations de base

## Air

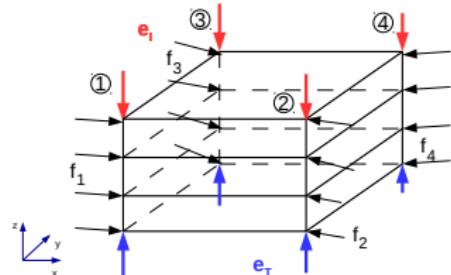
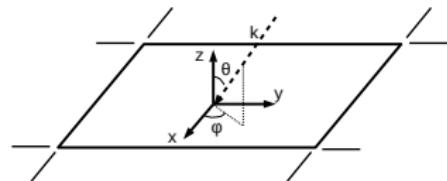
- Onde plane

$$p_i = \exp(i(k_x x + k_y y + k_z z))$$

- $k_x, k_y$  nombres d'ondes constants

## Plaque

- Cellule unitaire
- Éléments finis :  $\mathbf{D}\mathbf{u} = \mathbf{f} + \mathbf{e}$
- $u_2 = \exp(ik_x)u_1$  etc.



## Réduction du modèle EF

- Déplacements et efforts imposés

$$\mathbf{u} = (\mathbf{I}, \lambda_x \mathbf{I}, \lambda_y \mathbf{I}, \lambda_x \lambda_y \mathbf{I})^T \mathbf{u}_1 = \mathbf{T} \mathbf{u}_1; \mathbf{e} = \mathbf{T} \mathbf{e}_1$$

## Réduction du modèle EF

- Déplacements et efforts imposés

$$\mathbf{u} = (\mathbf{I}, \lambda_x \mathbf{I}, \lambda_y \mathbf{I}, \lambda_x \lambda_y \mathbf{I})^T \mathbf{u}_1 = \mathbf{T} \mathbf{u}_1; \mathbf{e} = \mathbf{T} \mathbf{e}_1$$

- Efforts internes

$$\mathbf{f}_1 + \lambda_x^{-1} \mathbf{f}_2 + \lambda_y^{-1} \mathbf{f}_3 + \lambda_x^{-1} \lambda_y^{-1} \mathbf{f}_4 = \tilde{\mathbf{T}} \mathbf{f} = 0$$

## Réduction du modèle EF

- Déplacements et efforts imposés

$$\mathbf{u} = (\mathbf{I}, \lambda_x \mathbf{I}, \lambda_y \mathbf{I}, \lambda_x \lambda_y \mathbf{I})^T \mathbf{u}_1 = \mathbf{T} \mathbf{u}_1; \mathbf{e} = \mathbf{T} \mathbf{e}_1$$

- Efforts internes

$$\mathbf{f}_1 + \lambda_x^{-1} \mathbf{f}_2 + \lambda_y^{-1} \mathbf{f}_3 + \lambda_x^{-1} \lambda_y^{-1} \mathbf{f}_4 = \tilde{\mathbf{T}} \mathbf{f} = 0$$

- Condensation

$$\tilde{\mathbf{T}} \mathbf{D} \mathbf{T} \mathbf{u}_1 = 4 \mathbf{A} \mathbf{u}_1 = \tilde{\mathbf{T}} \mathbf{T} \mathbf{e}_1 = 4 \mathbf{e}_1$$

## Réduction du modèle EF

- Déplacements et efforts imposés

$$\mathbf{u} = (\mathbf{I}, \lambda_x \mathbf{I}, \lambda_y \mathbf{I}, \lambda_x \lambda_y \mathbf{I})^T \mathbf{u}_1 = \mathbf{T} \mathbf{u}_1; \mathbf{e} = \mathbf{T} \mathbf{e}_1$$

- Efforts internes

$$\mathbf{f}_1 + \lambda_x^{-1} \mathbf{f}_2 + \lambda_y^{-1} \mathbf{f}_3 + \lambda_x^{-1} \lambda_y^{-1} \mathbf{f}_4 = \tilde{\mathbf{T}} \mathbf{f} = 0$$

- Condensation

$$\tilde{\mathbf{T}} \mathbf{D} \mathbf{T} \mathbf{u}_1 = 4 \mathbf{A} \mathbf{u}_1 = \tilde{\mathbf{T}} \mathbf{T} \mathbf{e}_1 = 4 \mathbf{e}_1$$

- Écriture des efforts en fonction des champs de pression

$$\begin{pmatrix} a_{II} & \mathbf{A}_{IO} & a_{IT} \\ \mathbf{A}_{OI} & \mathbf{A}_{OO} & \mathbf{A}_{OT} \\ a_{TI} & \mathbf{A}_{TO} & a_{TT} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_I \\ \mathbf{u}_O \\ u_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S(p_I + p_R) \\ \mathbf{0} \\ Sp_T \end{pmatrix}$$

## Réduction du modèle EF

- Écriture des efforts en fonction des champs de pression

$$\begin{pmatrix} a_{II} & \mathbf{A}_{IO} & a_{IT} \\ \mathbf{A}_{OI} & \mathbf{A}_{OO} & \mathbf{A}_{OT} \\ a_{TI} & \mathbf{A}_{TO} & a_{TT} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_I \\ \mathbf{u}_O \\ u_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S(p_I + p_R) \\ \mathbf{0} \\ Sp_T \end{pmatrix}$$

## Conditions aux limites

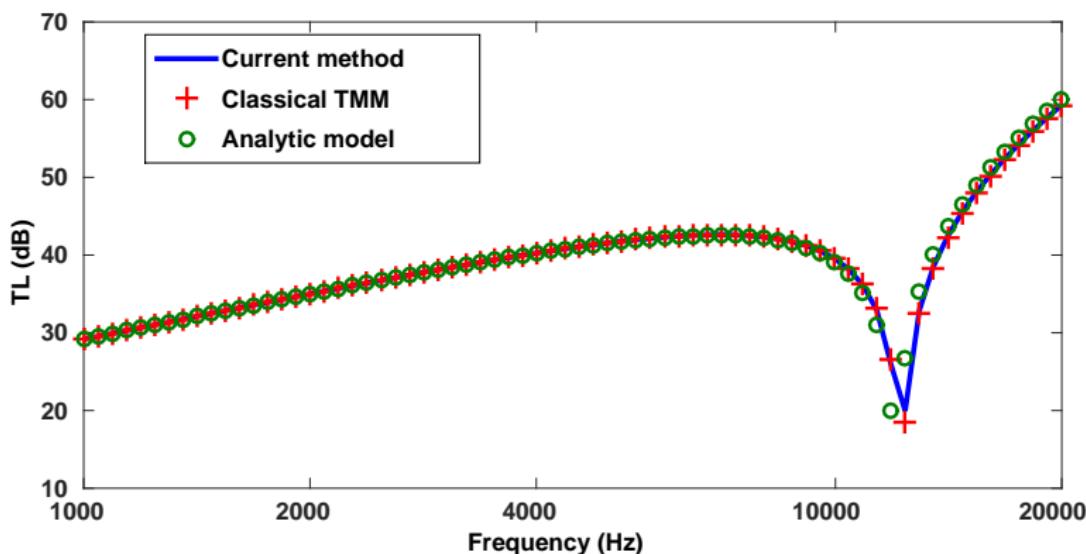
- Continuité des vitesses normales aux interfaces

$$\rho_0 \omega^2 u_I = \frac{\partial P_I}{\partial z} = -ik_z (p_I - p_R)$$

$$\rho_0 \omega^2 u_T = \frac{\partial P_T}{\partial z} = -ik_z p_T$$

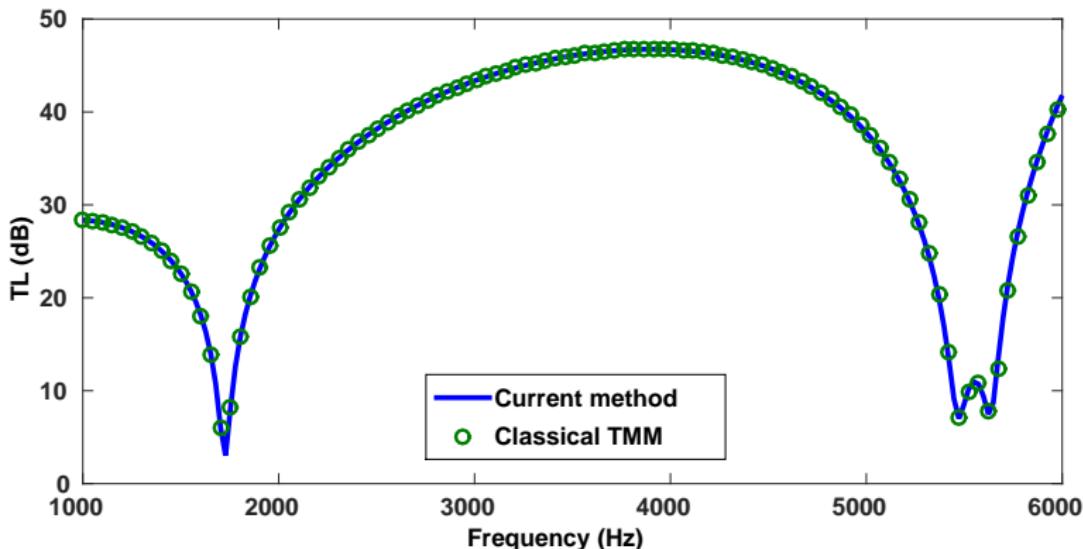
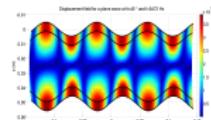
# Validation

Plaque isotrope (aluminium) sous onde plane à  $45^\circ$



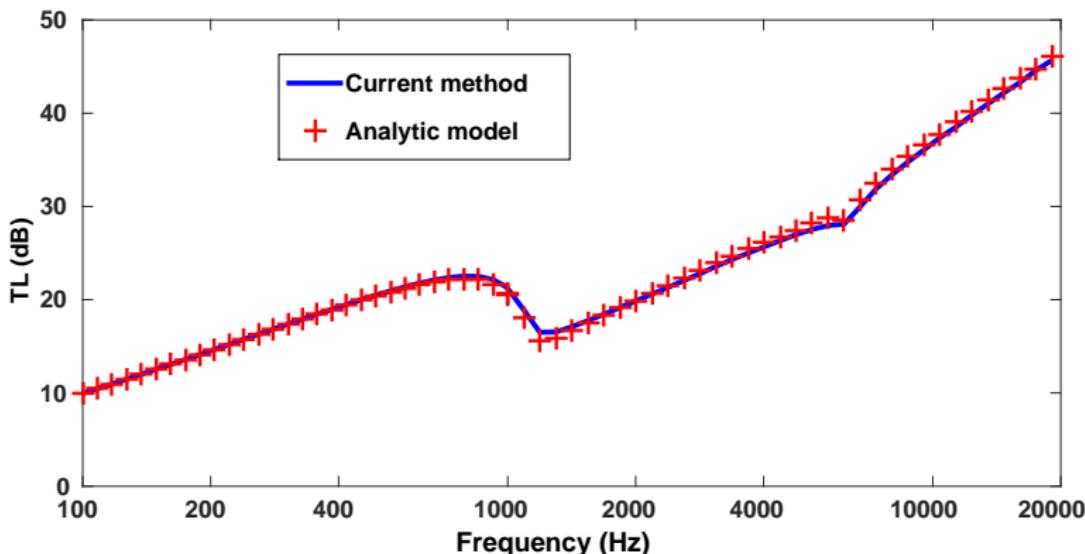
# Validation

Sandwich à âme souple sous onde plane à  $45^\circ$



# Validation

Plaque orthotrope sous champ diffus





ÉCOLE  
CENTRALE LYON

Introduction  
Modélisation

Analyse de sensibilité  
Effet d'un traitement poroélastique  
Conclusions

État de l'art  
TL de plaques par WFE  
Extension aux coques cylindriques

AIRBUS SAFRAN  
LAUNCHERS

# Table of Contents

## 1. Modélisation

- État de l'art
- TL de plaques par WFE
- Extension aux coques cylindriques

## 2. Analyse de sensibilité

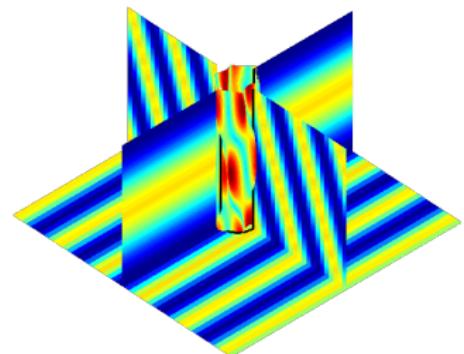
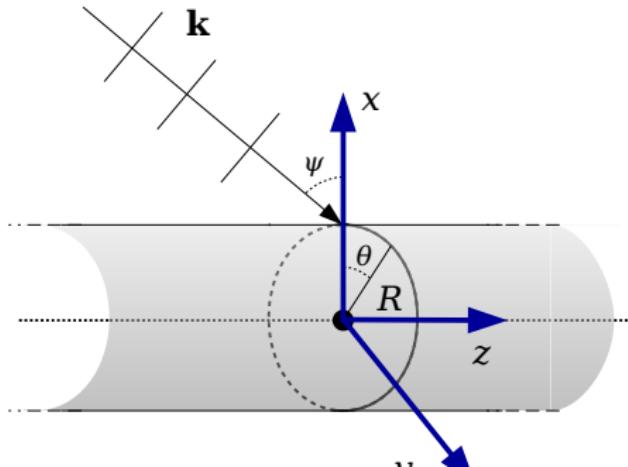
## 3. Effet d'un traitement poroélastique

## 4. Conclusions



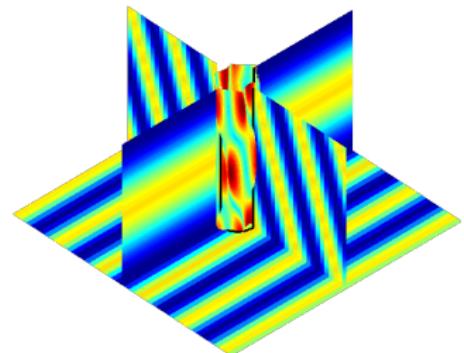
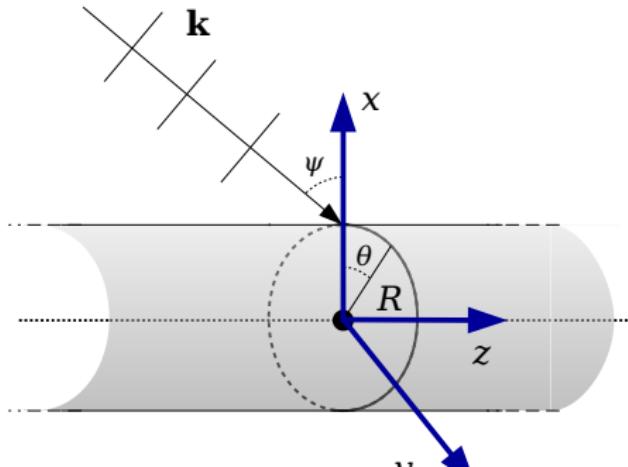
# Extension aux coques cylindriques

- Cylindre stratifié infini



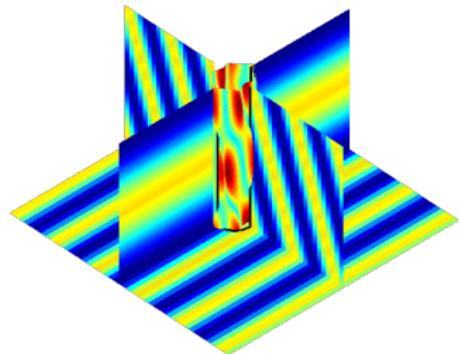
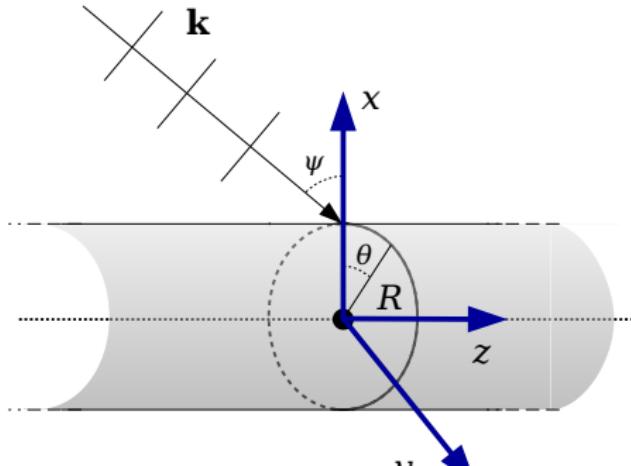
## Extension aux coques cylindriques

- Cylindre stratifié infini
- Couche élastiques linéaires



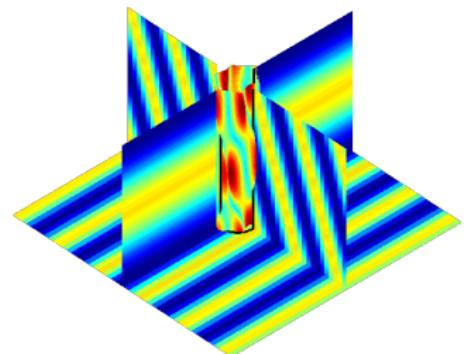
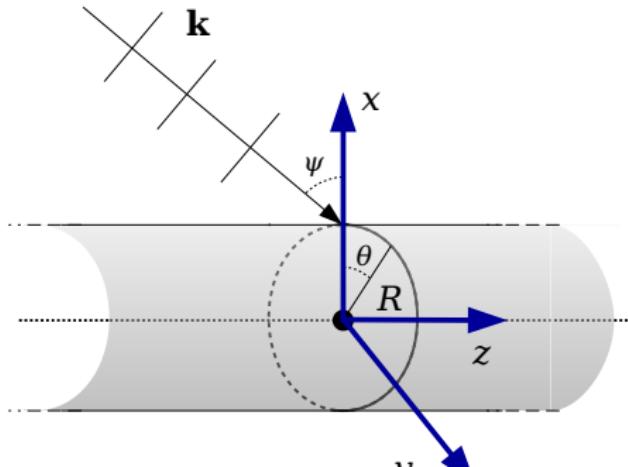
## Extension aux coques cylindriques

- Cylindre stratifié infini
- Couches élastiques linéaires
- Impacté par une onde plane



# Extension aux coques cylindriques

- Cylindre stratifié infini
- Couches élastiques linéaires
- Impacté par une onde plane
- Absorption parfaite au centre du cylindre



## Extension aux coques cylindriques

- Cylindre stratifié infini
- Couches élastiques linéaires
- Impacté par une onde plane

### État de l'art

- Monocouche : Koval (1979), Lee & Kim (2003), Yuan (2011)
- Tricouche : Magniez (2014)



ÉCOLE  
CENTRALE LYON

# Équations de base

## Air

- Décomposition de l'onde plane incidente en ondes cylindriques

$$p^I(r, \theta, z)\theta = P_0 \sum_{n \in \mathbb{Z}} i^n J_n(k_x r) e^{in\theta} e^{ik_z z} e^{i\omega t}$$

- Champs réfléchi et transmis : ondes progressives cylindriques



ÉCOLE  
CENTRALE LYON

# Équations de base

## Air

- Décomposition de l'onde plane incidente en ondes cylindriques

$$p^I(r, \theta, z)\theta = P_0 \sum_{n \in \mathbb{Z}} i^n J_n(k_x r) e^{in\theta} e^{ik_z z} e^{i\omega t}$$

- Champs réfléchi et transmis : ondes progressives cylindriques

# Équations de base

## Air

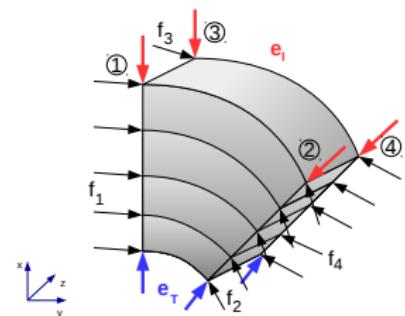
- Décomposition de l'onde plane incidente en ondes cylindriques

$$p^I(r, \theta, z)\theta = P_0 \sum_{n \in \mathbb{Z}} i^n J_n(k_x r) e^{in\theta} e^{ik_z z} e^{i\omega t}$$

- Champs réfléchi et transmis : ondes progressives cylindriques

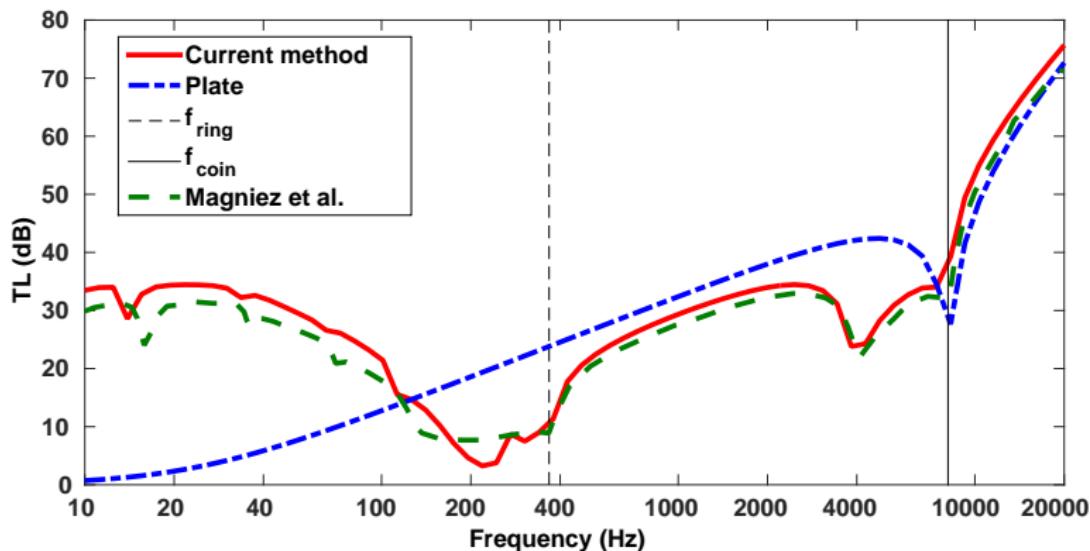
## Cylindre

- Cellule unitaire
- Éléments finis :  $\mathbf{D}\mathbf{u} = \mathbf{f} + \mathbf{e}$
- $u_2 = \exp(ik_x) \mathbf{R} u_1$  etc.



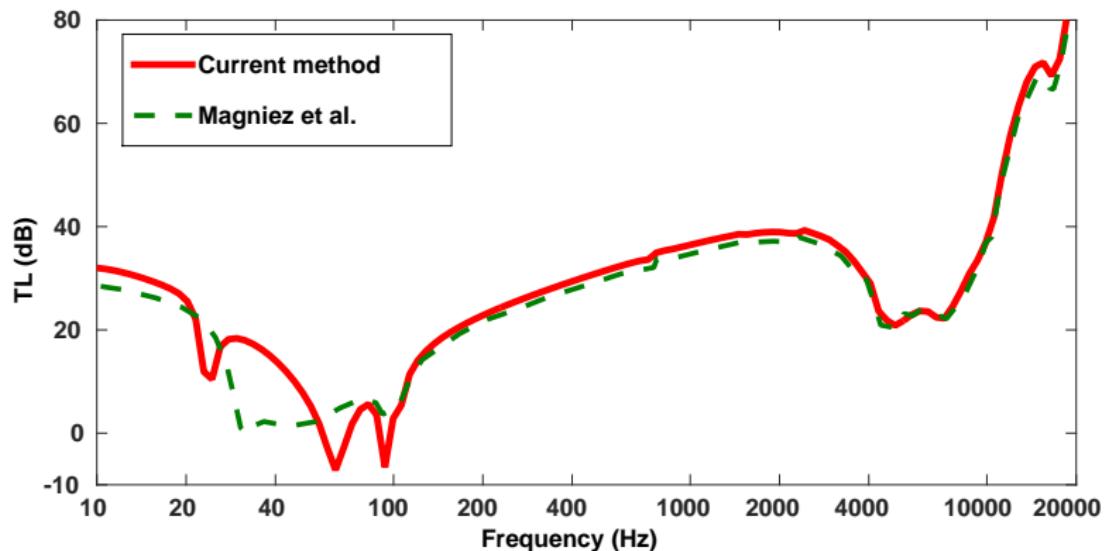
# Validation

Cylindre en aluminium, onde plane  $45^\circ$

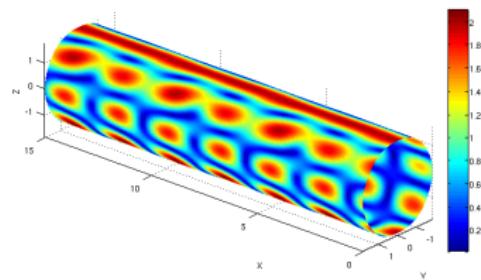
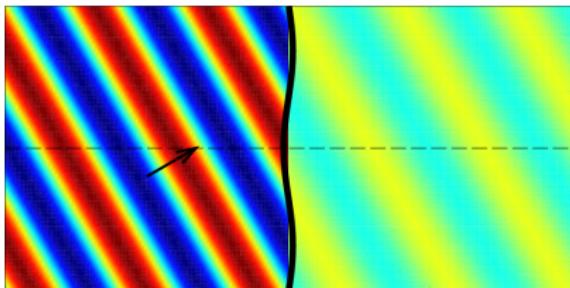


# Validation

Matériau sandwich, onde plane  $45^\circ$



## Conclusion : Modélisation



- Modèle WFE : plaque et cylindre infinis
  - matériaux anisotropes stratifiés
  - Validé pour monocouches et sandwiches
- 
- J-L. Christen, M. Ichchou, A. Zine, B. Troclet : *Wave finite element formulation of the acoustic transmission through complex infinite plates*, Acta Acustica united with Acustica, accepted for publication

# Table of Contents

1. Modélisation

2. Analyse de sensibilité

- Analyse de sensibilité
- Plaques infinies
- Modèle SEA

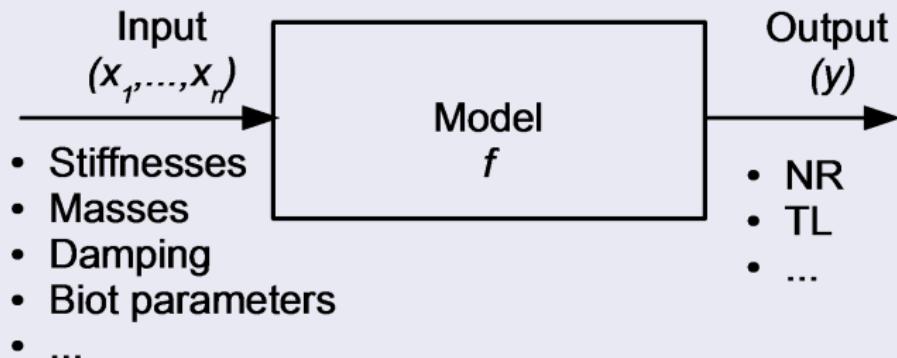
3. Effet d'un traitement poroélastique

4. Conclusions



# Qu'est ce que l'analyse de sensibilité ?

- Modèle «boîte noire» (fonction coût) :  $y = f(x_1, \dots, x_n)$
- Mesure de l'influence des paramètres sur la sortie



# Qu'est ce que l'analyse de sensibilité ?

- Modèle «boîte noire» (fonction coût) :  $y = f(x_1, \dots x_n)$
- Mesure de l'influence des paramètres sur la sortie

## Types d'analyse

- Locale : variations autour d'un point de fonctionnement
  - Dérivées partielles
- Globale : larges domaines de variations
  - Analyse de variance (ANOVA)

# Qu'est ce que l'analyse de sensibilité ?

- Modèle «boîte noire» (fonction coût) :  $y = f(x_1, \dots x_n)$
- Mesure de l'influence des paramètres sur la sortie

## Applications

- Réduction du nombre de paramètres
- Compréhension de phénomènes
- Déjà appliqué en sûreté nucléaire (Marrel 2008), chimie (Cukier 1973) ...

# Méthode FAST

## Principe de l'ANOVA

- $f = f_0 + \sum_i f_i(x_i) + \sum_{i < j} f_{ij}(x_i, x_j) + \sum_{i < j < k} f_{ijk}(x_i, x_j, x_k) + \dots$
- Effet principal : variance des  $f_i$

# Méthode FAST

## Principe de l'ANOVA

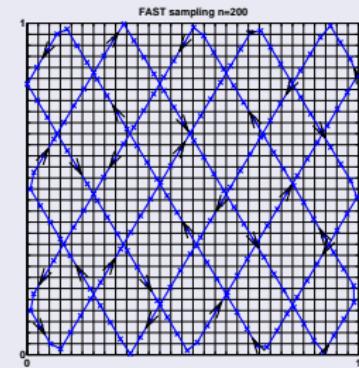
- $f = f_0 + \sum_i f_i(x_i) + \sum_{i < j} f_{ij}(x_i, x_j) + \sum_{i < j < k} f_{ijk}(x_i, x_j, x_k) + \dots$
- Effet principal : variance des  $f_i$

## Échantillonnage

- Courbe "remplissant l'espace"

$$x_i = \frac{1}{\pi} \arcsin(\sin(\omega_i s + \varphi_i)) + \frac{1}{2}$$

- $\omega_i \in \mathbb{N}^*$  : fréquence assignée à chaque paramètre



# Méthode FAST

## Calcul des indices du 1er ordre

- Série de Fourier

$$y(s) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \hat{y}_n \exp(\text{i}ns)$$

# Méthode FAST

## Calcul des indices du 1er ordre

- Série de Fourier

$$y(s) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \hat{y}_n \exp(\text{i}ns)$$

- Parseval :

$$D = \sum_{k \in \mathbb{Z}} |\hat{y}_k|^2$$

# Méthode FAST

## Calcul des indices du 1er ordre

- Série de Fourier

$$y(s) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \hat{y}_n \exp(\text{i}ns)$$

- Parseval :

$$D = \sum_{k \in \mathbb{Z}} |\hat{y}_k|^2$$

- Variance partielle :

$$D_i = \sum_{k=1}^M |\hat{y}_{k\omega_i}|^2$$

# Table of Contents

1. Modélisation

2. Analyse de sensibilité

- Analyse de sensibilité
- Plaques infinies
- Modèle SEA

3. Effet d'un traitement poroélastique

4. Conclusions



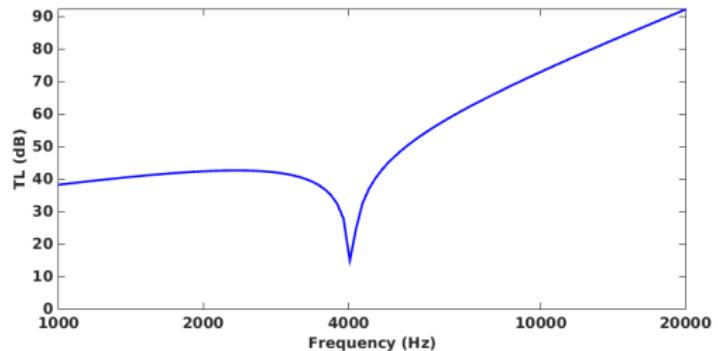
## Plaque isotrope

- Aluminium :  $E, \nu, \rho, \eta \pm 10\%$
- Onde incidente plane à  $45^\circ$



### Courbe de TL

- BF : loi de masse



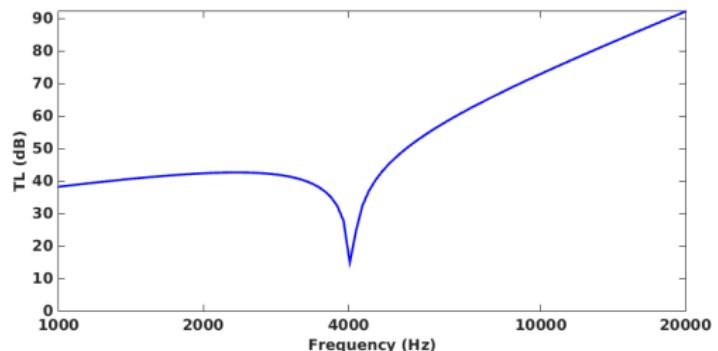
# Plaque isotrope

- Aluminium :  $E, \nu, \rho, \eta \pm 10\%$
- Onde incidente plane à  $45^\circ$



## Courbe de TL

- BF : loi de masse
- Coïncidence :  $f_c = \frac{c_0^2}{2\pi \cos \theta} \sqrt{\frac{12\rho(1-\nu^2)}{Eh^2}}$
- Profondeur du creux lié à l'amortissement



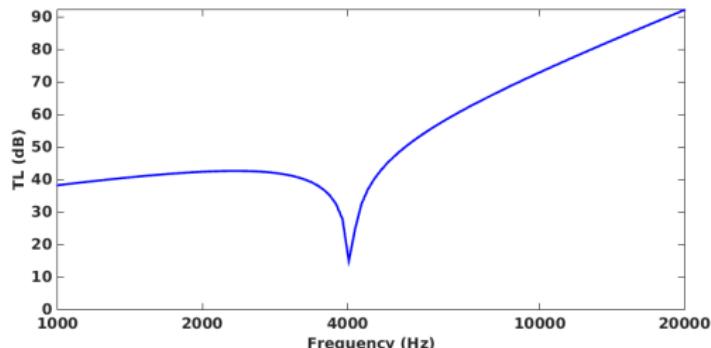
# Plaque isotrope

- Aluminium :  $E$ ,  $\nu$ ,  $\rho$ ,  $\eta \pm 10\%$
- Onde incidente plane à  $45^\circ$



## Courbe de TL

- BF : loi de masse
- Coïncidence :  $f_c = \frac{c_0^2}{2\pi \cos \theta} \sqrt{\frac{12\rho(1-\nu^2)}{Eh^2}}$
- Profondeur du creux lié à l'amortissement
- HF contrôlées par la raideur



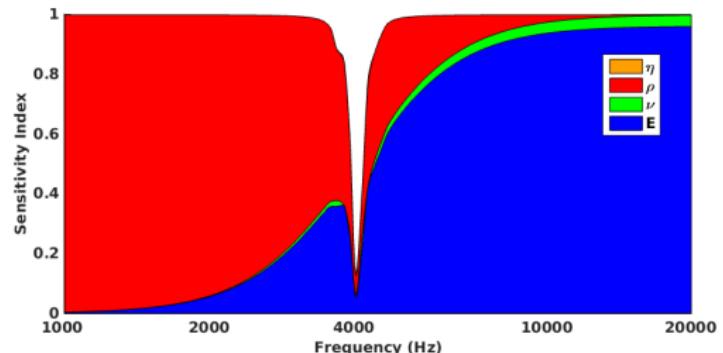
# Plaque isotrope

- Aluminium :  $E$ ,  $\nu$ ,  $\rho$ ,  $\eta \pm 10\%$
- Onde incidente plane à  $45^\circ$



## Courbe de TL

- BF : loi de masse
- Coïncidence :  $f_c = \frac{c_0^2}{2\pi \cos \theta} \sqrt{\frac{12\rho(1-\nu^2)}{Eh^2}}$
- Profondeur du creux lié à l'amortissement
- HF contrôlées par la raideur





ÉCOLE  
CENTRALE LYON

Introduction  
Modélisation

Analyse de sensibilité

Effet d'un traitement poroélastique

Conclusions

Analyse de sensibilité

Plaques infinies

Modèle SEA

AIRBUS SAFRAN  
LAUNCHERS

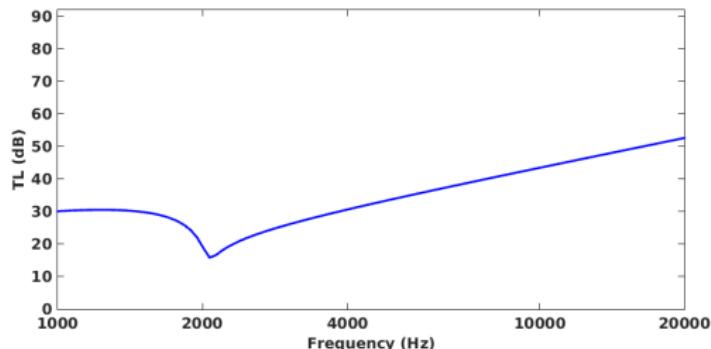
# Plaque isotrope

- Aluminium :  $E$ ,  $\nu$ ,  $\rho$ ,  $\eta \pm 10\%$
- Champ diffus



## Courbe de TL

- BF : loi de masse
- Coïncidence :  $f_c = \frac{c_0^2}{2\pi \cos \theta} \sqrt{\frac{12\rho(1-\nu^2)}{Eh^2}}$
- Profondeur du creux lié à l'amortissement
- HF contrôlées par l'amortissement



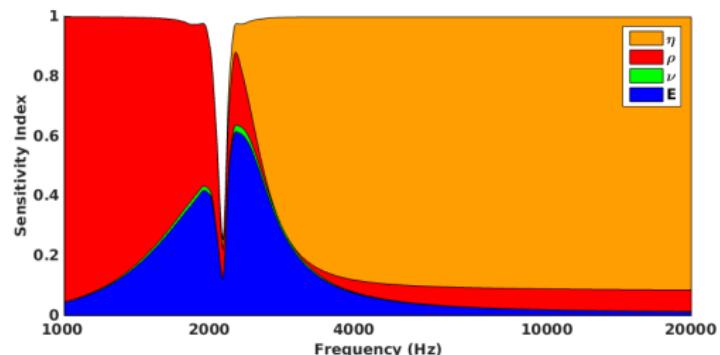
# Plaque isotrope

- Aluminium :  $E$ ,  $\nu$ ,  $\rho$ ,  $\eta \pm 10\%$
- Champ diffus



## Courbe de TL

- BF : loi de masse
- Coïncidence :  $f_c = \frac{c_0^2}{2\pi \cos \theta} \sqrt{\frac{12\rho(1-\nu^2)}{Eh^2}}$
- Profondeur du creux lié à l'amortissement
- HF contrôlées par l'amortissement



# Table of Contents

1. Modélisation

2. Analyse de sensibilité

- Analyse de sensibilité
- Plaques infinies
- Modèle SEA

3. Effet d'un traitement poroélastique

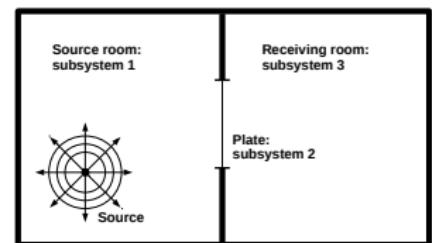
4. Conclusions



# Modèle SEA

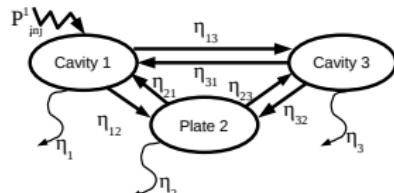
## Principe

- Systèmes résonants
- Puissances échangée et dissipée  $\propto$  niveau d'énergie
- Bilan de puissance sur chaque système



## Hypothèses

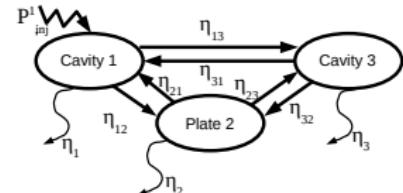
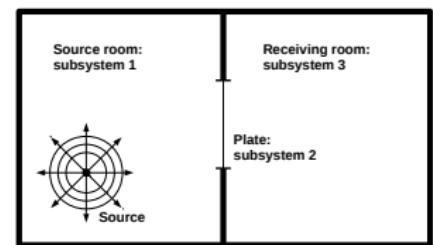
- HF : modes nombreux et superposition élevée
- Équipartition de l'énergie entre modes dans une bande de fréquence



# Modèle SEA

## Suite de transmission

- 2 chambres identiques
- Plaque composite entre les deux
- NR :  $\neq$  niveaux de pression



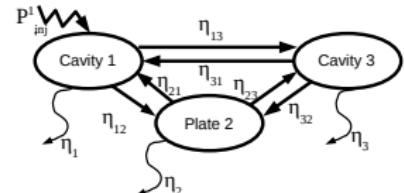
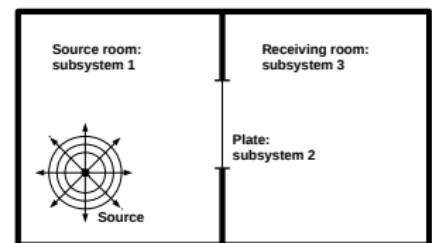
# Modèle SEA

## Suite de transmission

- 2 chambres identiques
- Plaque composite entre les deux
- NR :  $\neq$  niveaux de pression

## Incertitudes de modélisation

- Paramètres SEA
- Dissipation (DLF), couplage (CLF)



# Modèle SEA

## Suite de transmission

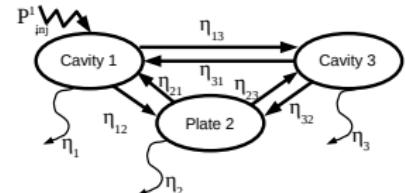
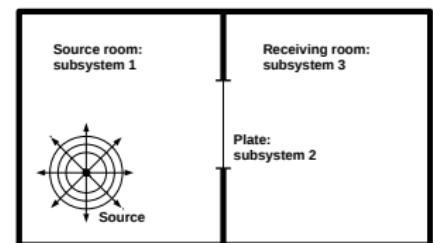
- 2 chambres identiques
- Plaque composite entre les deux
- NR :  $\neq$  niveaux de pression

## Incertitudes de modélisation

- Paramètres SEA
- Dissipation (DLF), couplage (CLF)

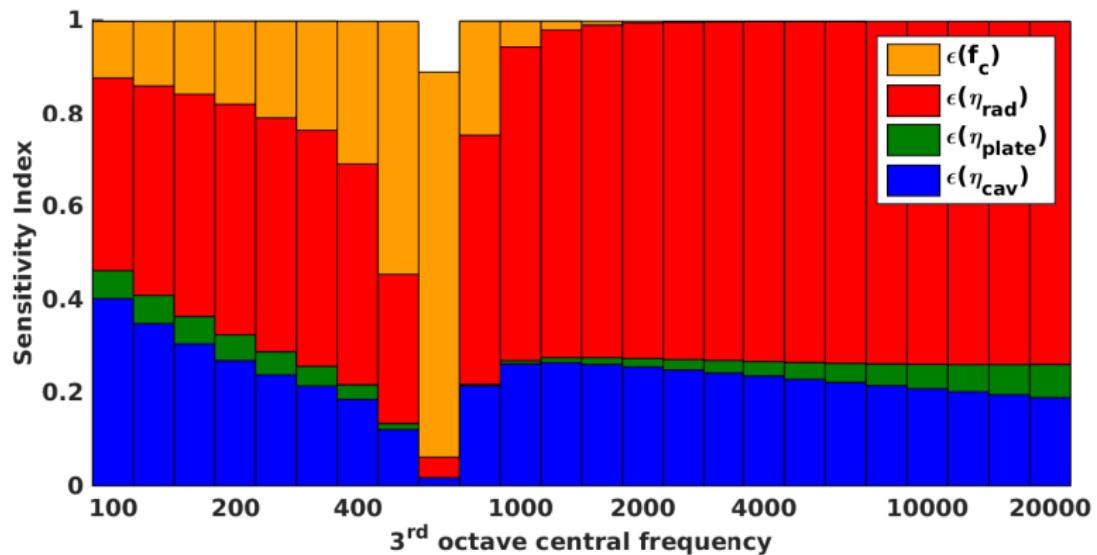
## Incertitudes paramétriques

- Paramètres "ingénieur"
- Module d'Young, cisaillement,...

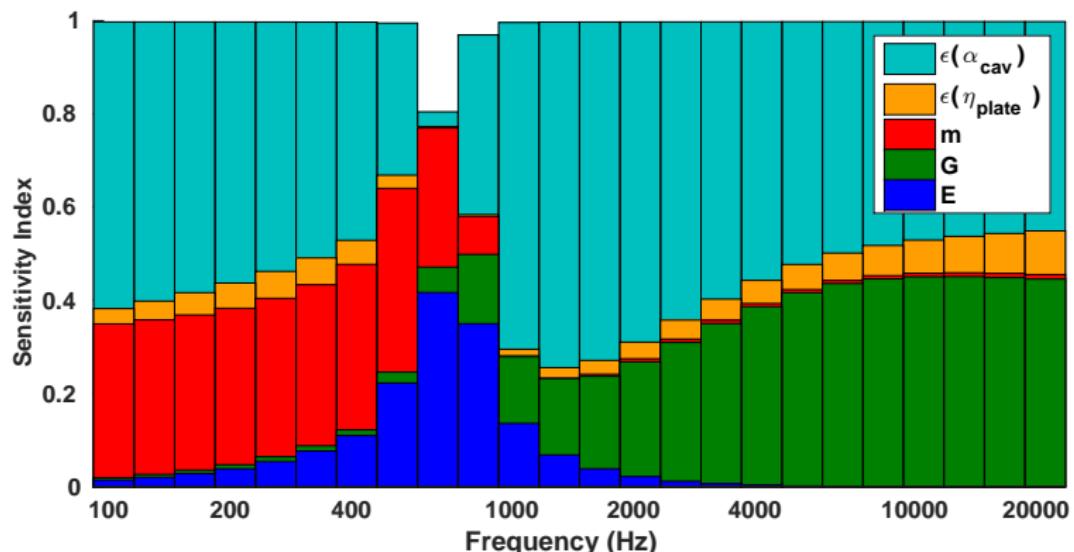


# Incertitudes de modélisation

Marges d'erreur sur les paramètres SEA :



## Paramètres "ingénieur"



# SYLDA-like

## Maquette de SYLDA

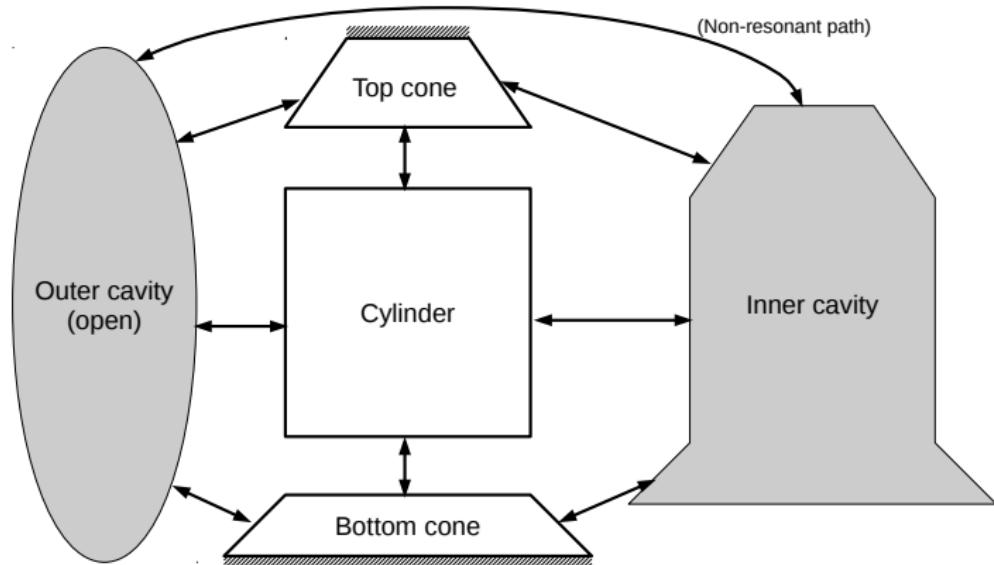
- 2 cônes et 1 cylindre
- Champ diffus interne et externe

## Modèle

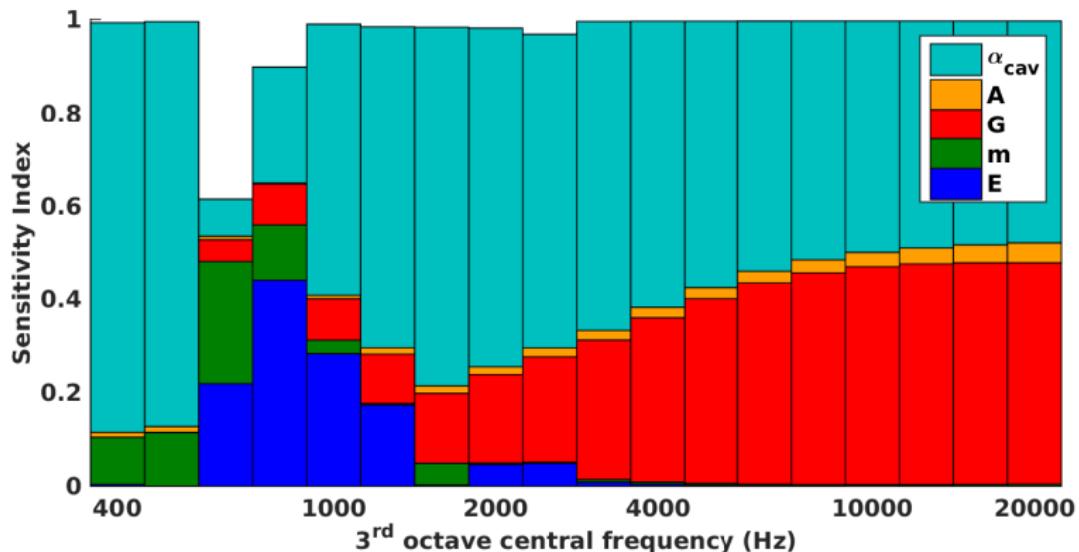
- Matériau composite (Sandwich)
- Isolement brut (NR)



# Modèle SEA



## Résultats



## Conclusion : Analyse de sensibilité

- FAST applicable à des problèmes de vibroacoustique
  - Modèles analytiques
  - Code industriel SEALASCAR
- 
- Séparation de phénomènes :
  - absorption/ amortissement
  - masse/raideur
  - Effet de la fréquence de coïncidence ou fréquence critique

- J.-L. Christen, M. Ichchou , B. Troclet, O. Bareille, M. Ouisse, *Global sensitivity analysis of analytical vibroacoustic transmission models*, J. Sound Vib., 2016
- J.-L. Christen, M. Ichchou , B. Troclet, O. Bareille, M. Ouisse, *Global sensitivity analysis and uncertainties in SEA models of vibroacoustic systems*, Mech. Syst. Sig. Proc., under review

# Table of Contents

1. Modélisation
2. Analyse de sensibilité
3. Effet d'un traitement poroélastique
  - Étude expérimentale
  - Modèle
  - Résultats
4. Conclusions



## Contexte

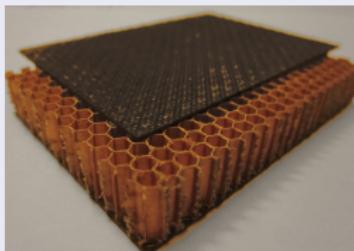
- Plaque composite avec matériau fibreux
- Incertitudes sur chaque composant

## Contexte

- Plaque composite avec matériau fibreux
- Incertitudes sur chaque composant

### Plaque sandwich

- Peaux fibre de carbone
- Âme nomex
- Traitement amortissant variable

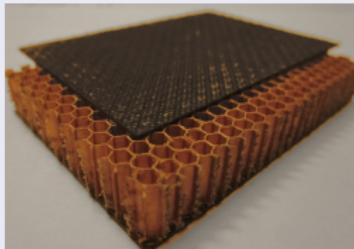


## Contexte

- Plaque composite avec matériau fibreux
- Incertitudes sur chaque composant

### Plaque sandwich

- Peaux fibre de carbone
- Âme nomex
- Traitement amortissant variable

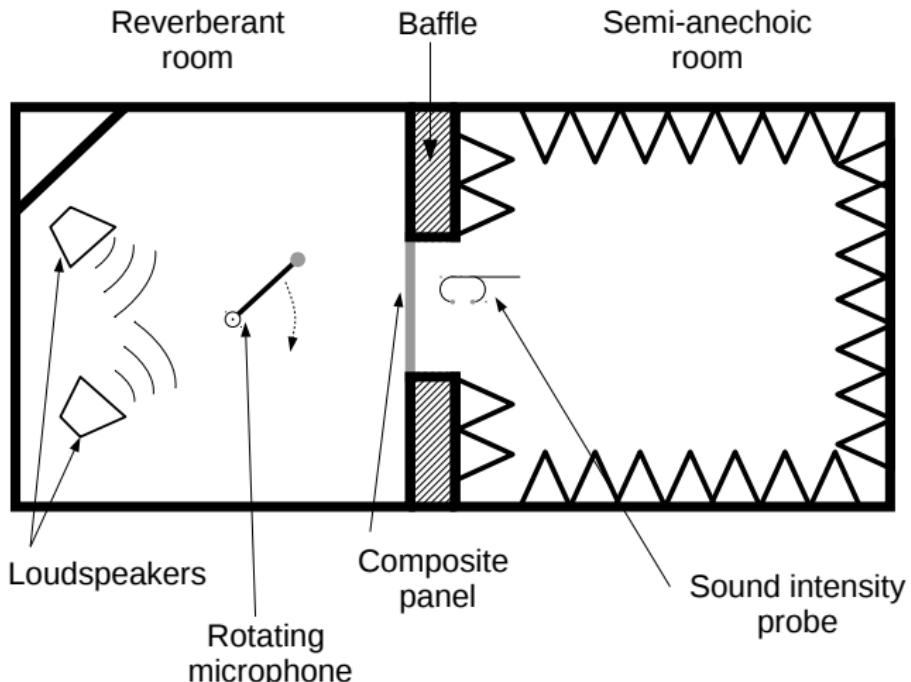


### Traitement acoustique

- Laine de verre
- Mousse mélamine
- Espace (air) entre plaque et poreux



# Mesure de TL (Sherbrooke)





ÉCOLE  
CENTRALE LYON

Introduction

Modélisation

Analyse de sensibilité

Effet d'un traitement poroélastique

Conclusions

Étude expérimentale

Modèle

Résultats

AIRBUS SAFRAN  
LAUNCHERS

# Mesure de TL (Sherbrooke)



# Étude paramétrique : 9 cas

## Traitement poreux (côté anéchoïque)

- aucun : plaque seule



# Étude paramétrique : 9 cas

## Traitement poreux (côté anéchoïque)

- aucun : plaque seule
- Fibre de verre aéronautique (FG631)



# Étude paramétrique : 9 cas

## Traitement poreux (côté anéchoïque)

- aucun : plaque seule
- Fibre de verre aéronautique (FG631)
- Mélamine (Ultra-light, 1 in)



## Étude paramétrique : 9 cas

### Traitement poreux (côté anéchoïque)

- aucun : plaque seule
- Fibre de verre aéronautique (FG631)
- Mélamine (Ultra-light, 1 in)



### Traitement viscoélastique (côté réverbérant)

- aucun : plaque seule



## Étude paramétrique : 9 cas

### Traitement poreux (côté anéchoïque)

- aucun : plaque seule
- Fibre de verre aéronautique (FG631)
- Mélamine (Ultra-light, 1 in)



### Traitement viscoélastique (côté réverbérant)

- aucun : plaque seule
- couverture de 38%



# Étude paramétrique : 9 cas

## Traitement poreux (côté anéchoïque)

- aucun : plaque seule
- Fibre de verre aéronautique (FG631)
- Mélamine (Ultra-light, 1 in)



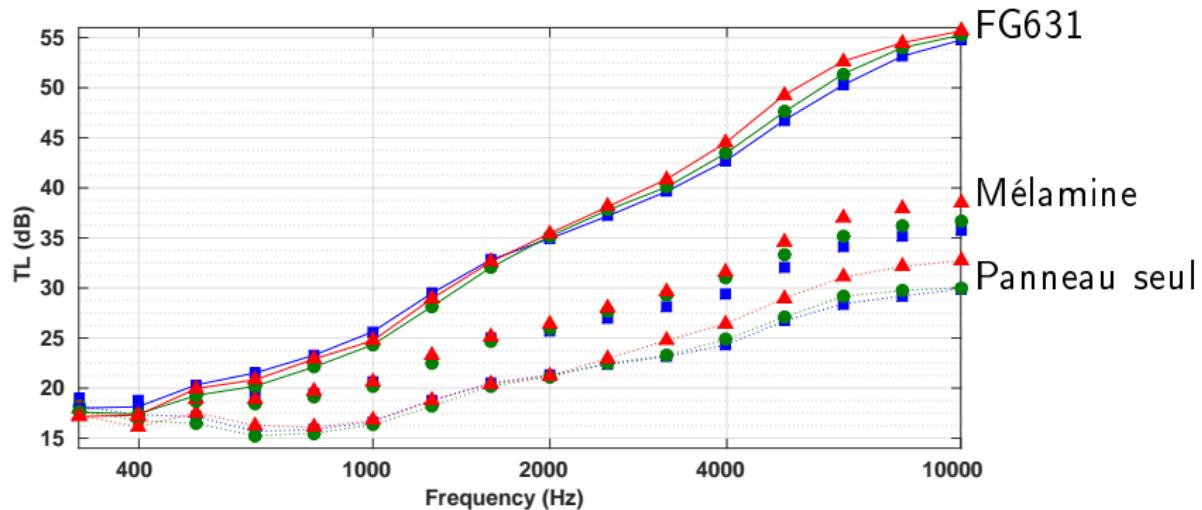
## Traitement viscoélastique (côté réverbérant)

- aucun : plaque seule
- couverture de 38%
- couverture de 77%



# Étude paramétrique : résultats

## Mesures



# Table of Contents

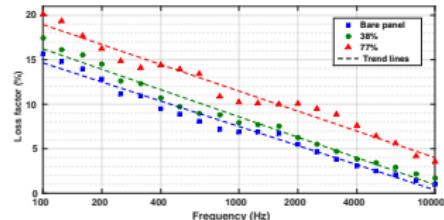
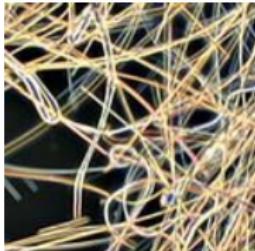
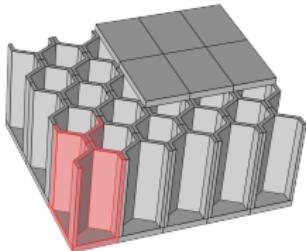
1. Modélisation
2. Analyse de sensibilité
3. Effet d'un traitement poroélastique
  - Étude expérimentale
  - Modèle
  - Résultats
4. Conclusions



# Modèle numérique

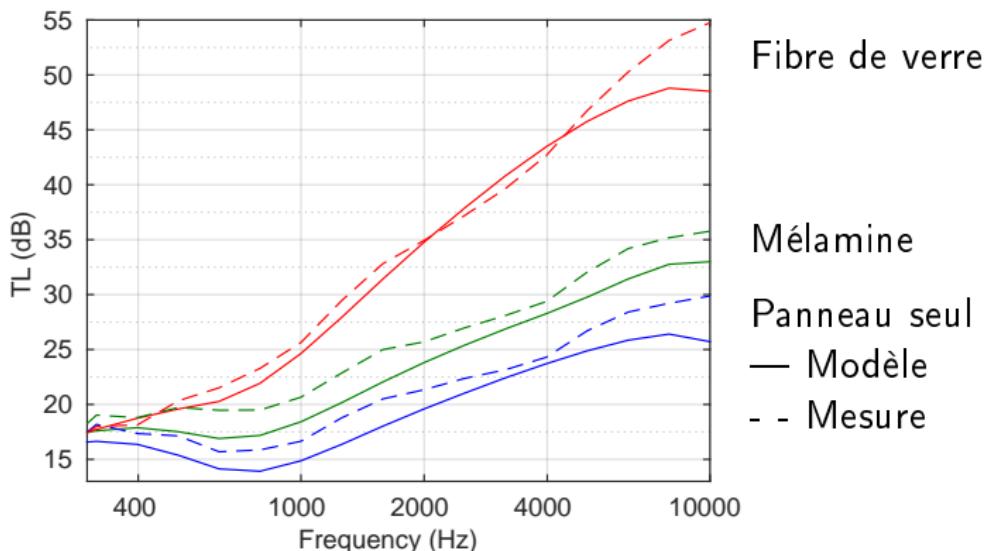
## TMM simplifiée

- Plaque composite (Narayanan 1982)
- Air gap
- Matériau poreux souple (limp)
- Amortissement plaque  $\eta = \eta_0 - 3.2\ln f$



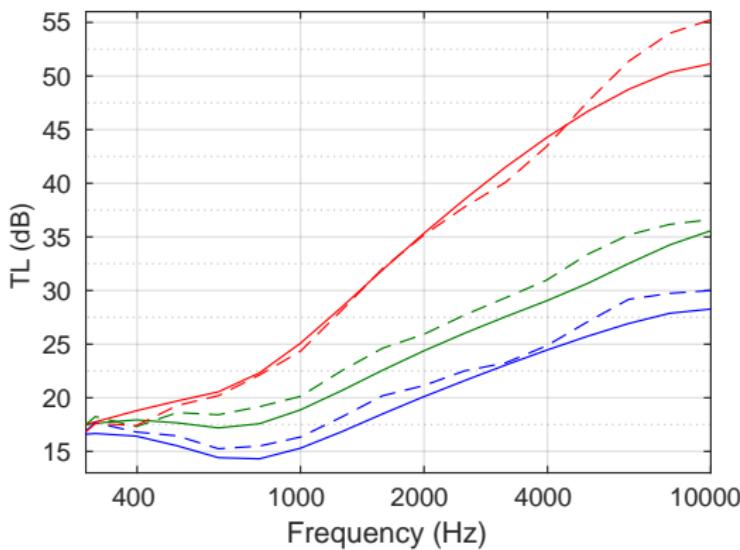
# Validation du modèle

## Panneau non amorti



# Validation du modèle

Panneau amorti à 38%



Fibre de verre

Mélamine

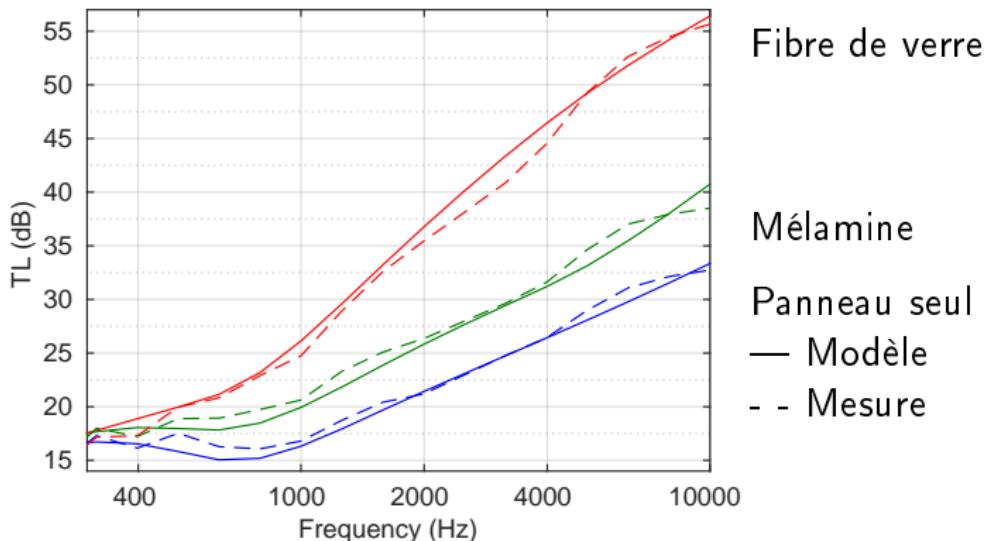
Panneau seul

— Modèle

- - Mesure

## Validation du modèle

Panneau amorti à 77%



# Table of Contents

1. Modélisation

2. Analyse de sensibilité

3. Effet d'un traitement poroélastique

- Étude expérimentale
- Modèle
- Résultats

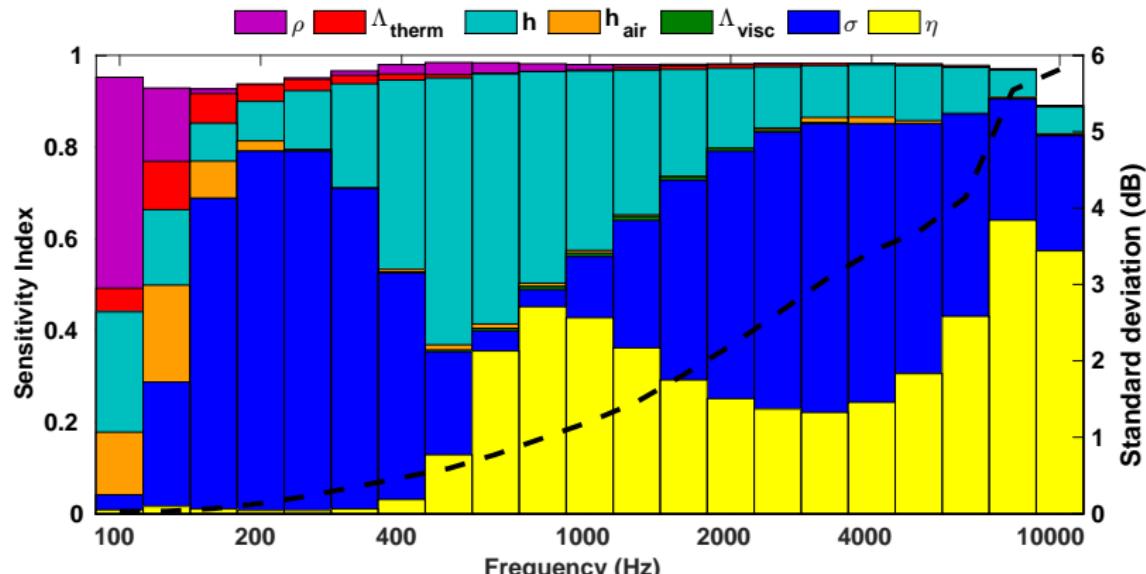
4. Conclusions



# Analyse FAST

## Plages de variation des paramètres englobant les plages mesurées

	$\eta_0$ (%)	$\sigma$ (N.s.m <sup>-4</sup> )	$\Lambda_{visc}$ ( $\mu\text{m}$ )	$h_{air}$ (mm)	$h$ (mm)	$\Lambda_{therm}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )
Min. Value	28	5000	75	10	25	98	7
Max. Value	35	30 000	700	30	40	160	10



# Conclusions

## Axe modélisation

- Modèle hybride analytique/EF
- TL de plaques multicouches
- Cylindres
- Benchmark : modèles analytiques
- Cas industriels

# Conclusions

## Axe modélisation

- Modèle hybride analytique/EF
- TL de plaques multicouches
- Cylindres
- Benchmark : modèles analytiques
- Cas industriels

## Application de la méthode FAST au contexte vibroacoustique

- Étude d'incertitudes paramétriques
- Méconnaissance / aléatoire
- Modèles analytiques de plaques : validation du principe
- TL de systèmes avec poreux : effets absorption/amortissement

## Perspectives

### Extensions des modèles de transmission

- Modèle de Biot : modifie le couplage avec les interfaces extérieures
- Résonances internes du cylindre
- Prise en compte de la périodicité de la structure (nid d'abeilles) en HF

### Corrélations

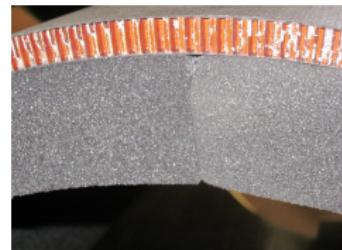
- Changement d'échelle micro-macro
- Utilisation d'une méthode FAST corrélée

Merci pour votre attention

# Dispositif d'essai

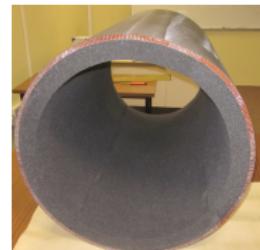
## Structure

- Coque cylindrique
- Sandwich carbone-époxy/Nomex
- Diamètre 70 cm
- Hauteur 1,2m



## Essais

- Essais vibratoires caractérisation
- Essais acoustiques (NR avec mousse PU)



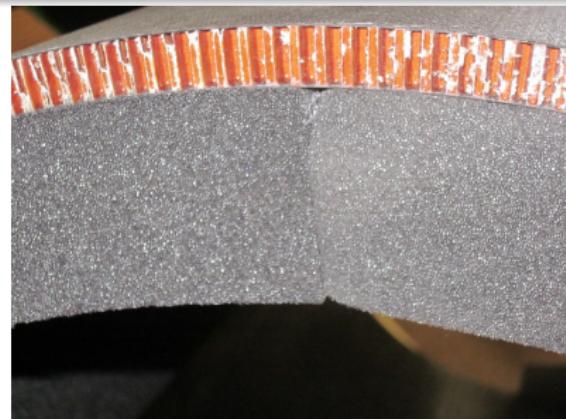


ÉCOLE  
CENTRALE LYON

## Essais acoustiques

### Objectifs

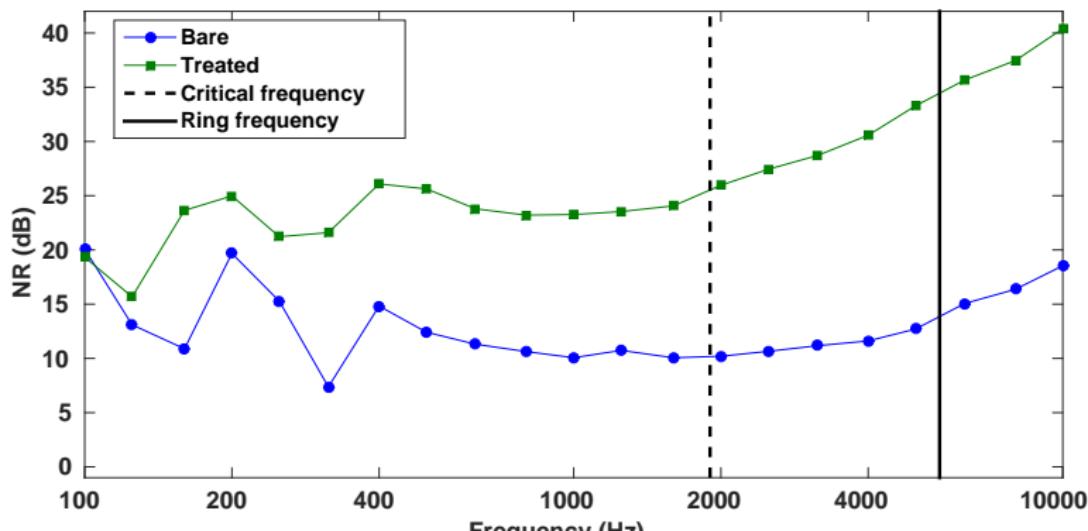
- Effet d'une couche poroélastique sur le NR
- Contribution des différents effets : absorption/masse/cavité



# Essais acoustiques

## Objectifs

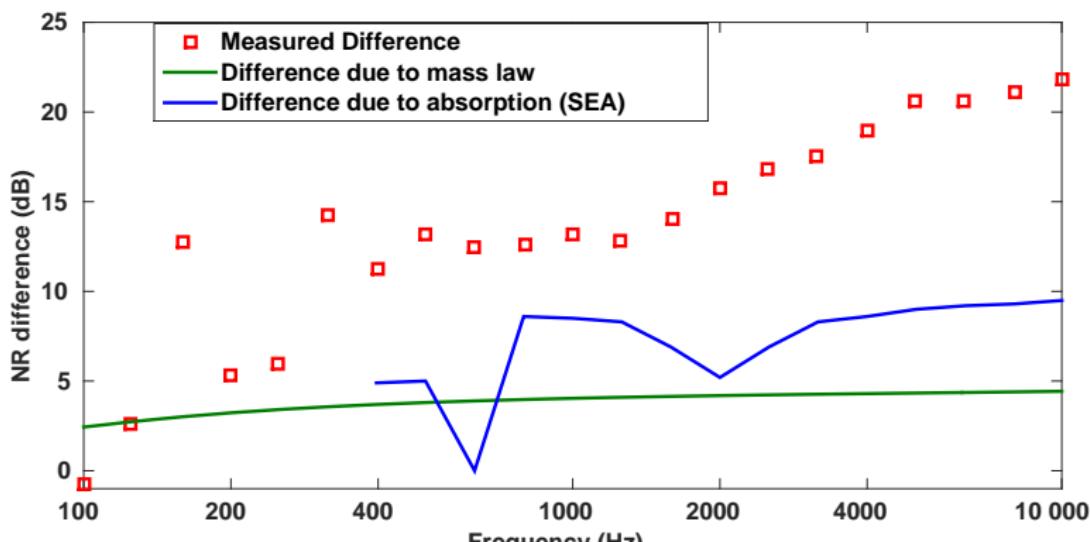
- Effet d'une couche poroélastique sur le NR
- Contribution des différents effets : absorption/masse/cavité



# Essais acoustiques

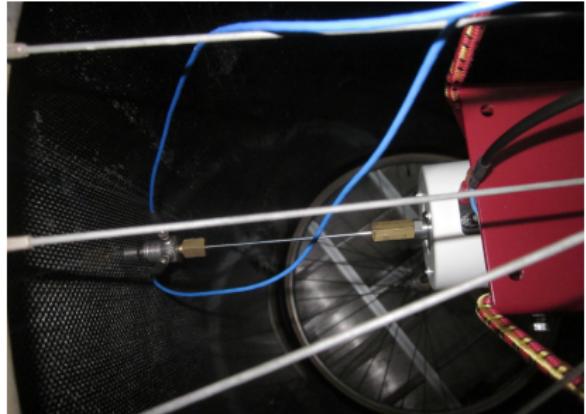
## Objectifs

- Effet d'une couche poroélastique sur le NR
- Contribution des différents effets : absorption/masse/cavité



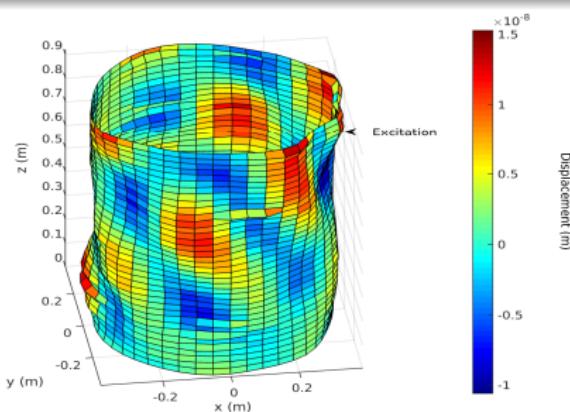
# Caractérisation mécanique

- Mesure de vitesses au vibromètre laser



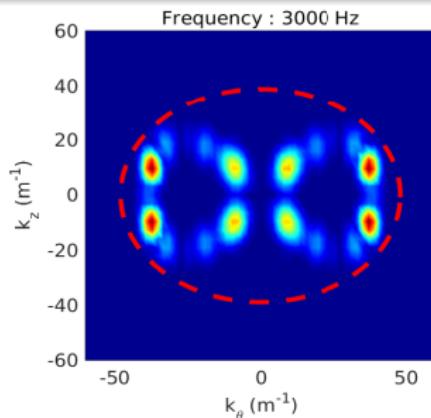
# Caractérisation mécanique

- Mesure de vitesses au vibromètre laser



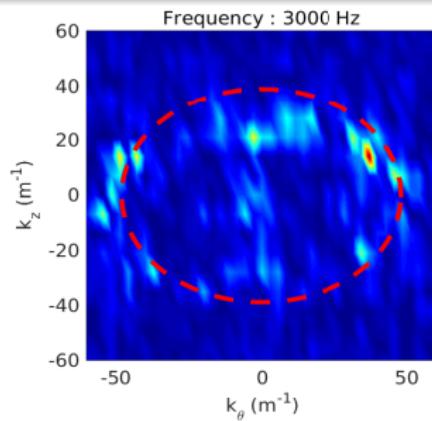
# Caractérisation mécanique

- Mesure de vitesses au vibromètre laser
- Transformée de Fourier 2D



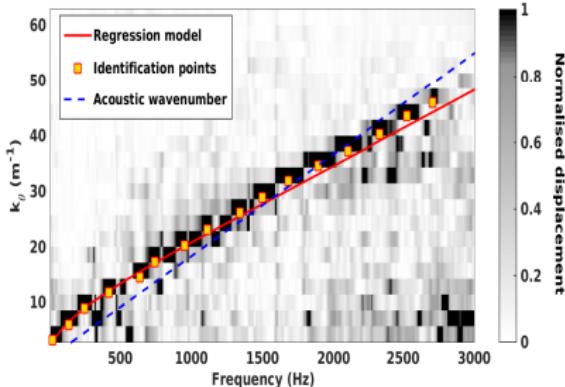
# Caractérisation mécanique

- Mesure de vitesses au vibromètre laser
- Transformée de Fourier 2D

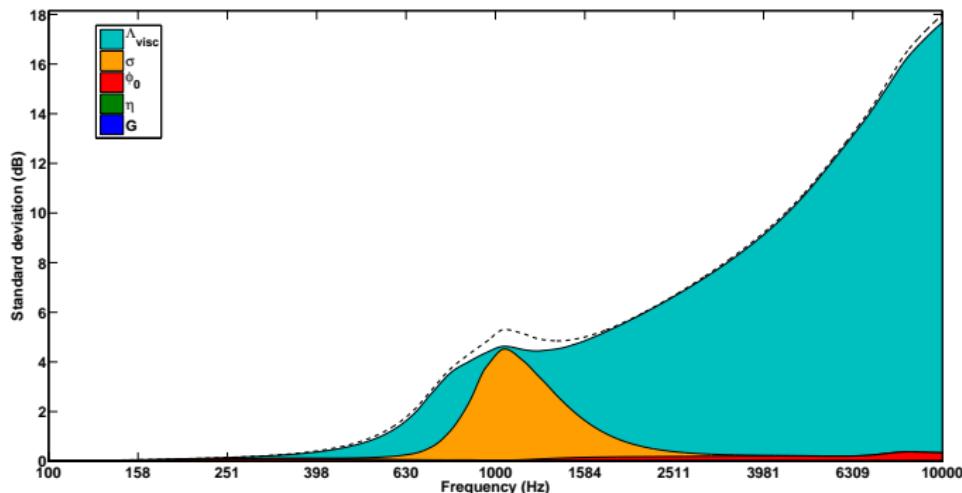


# Caractérisation mécanique

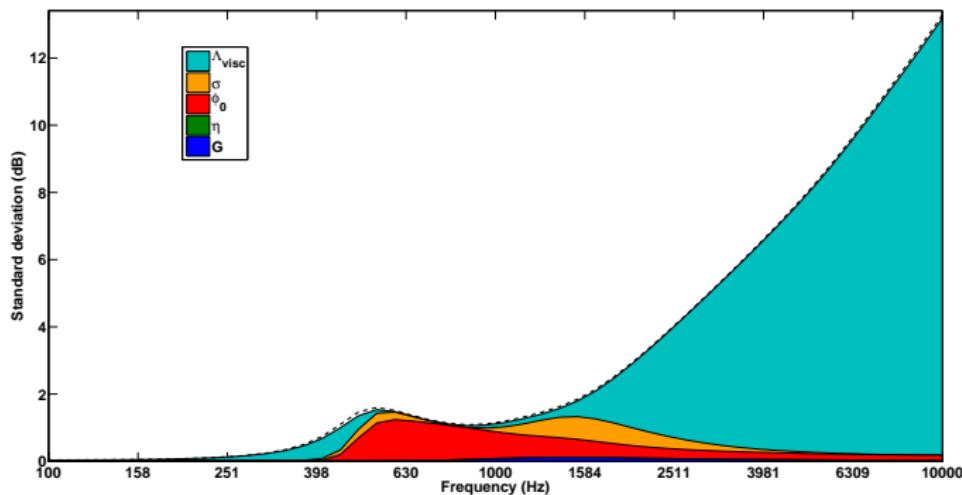
- Mesure de vitesses au vibromètre laser
- Transformée de Fourier 2D
- Identification /modèle de sandwich



# Étude numérique de l'effet de l'incertitude du traitement poreux



# Étude numérique de l'effet de l'incertitude du traitement poreux



# Étude numérique de l'effet de l'incertitude du traitement poreux

