

Mesure d'absorption des matériaux acoustiques par antenne synthétique: le cas des basses fréquences

Alain Berry, Olivier Robin, Celse Kafui Amedin, Noureddine Atalla, Olivier
Doutres and Franck Sgard

Plan

- Introduction et contexte
- Approche de mesure d'absorption par synthèse de champ
- Simulations numériques
- Mesures
- Le cas des basses fréquences

Introduction

- Mesure d'absorption en tube d'impédance: limitée à l'incidence perpendiculaire
- Mesure du coefficient d'absorption en incidence aléatoire (ou Sabine) : en chambre réverbérante selon normes (ASTM C423, ISO 354)
- Les temps de réverbération avec (T_{sample}) et sans matériau (T_0) sont mesurés, et le coefficient d'absorption est déduit selon

$$\alpha = \frac{55.3 V}{c_0 S} \left[\frac{1}{T_{sample}} - \frac{1}{T_0} \right]$$

V: volume de la chambre; S aire de l'échantillon

Difficulté 1:

ASTM C423 : **V=125 m³ minimum - S=6.7 m²**

ISO 354: **V=150 m³ minimum – S=12 m²**

Introduction (...)

Difficulté 2:

La mesure est fortement dépendante de la **taille** et de l'**installation** de l'échantillon, avec une possible **surestimation** de l'absorption ($\alpha > 1$) – ne peut pas être utilisé directement dans des codes d'acoustique prévisionnelle.

DEPENDENCE OF SOUND ABSORPTION UPON THE AREA AND DISTRIBUTION OF THE ABSORBENT MATERIAL

By V. L. Chrisler

Journal of research of the national bureau of standards, RP700, 1934

ABSTRACT

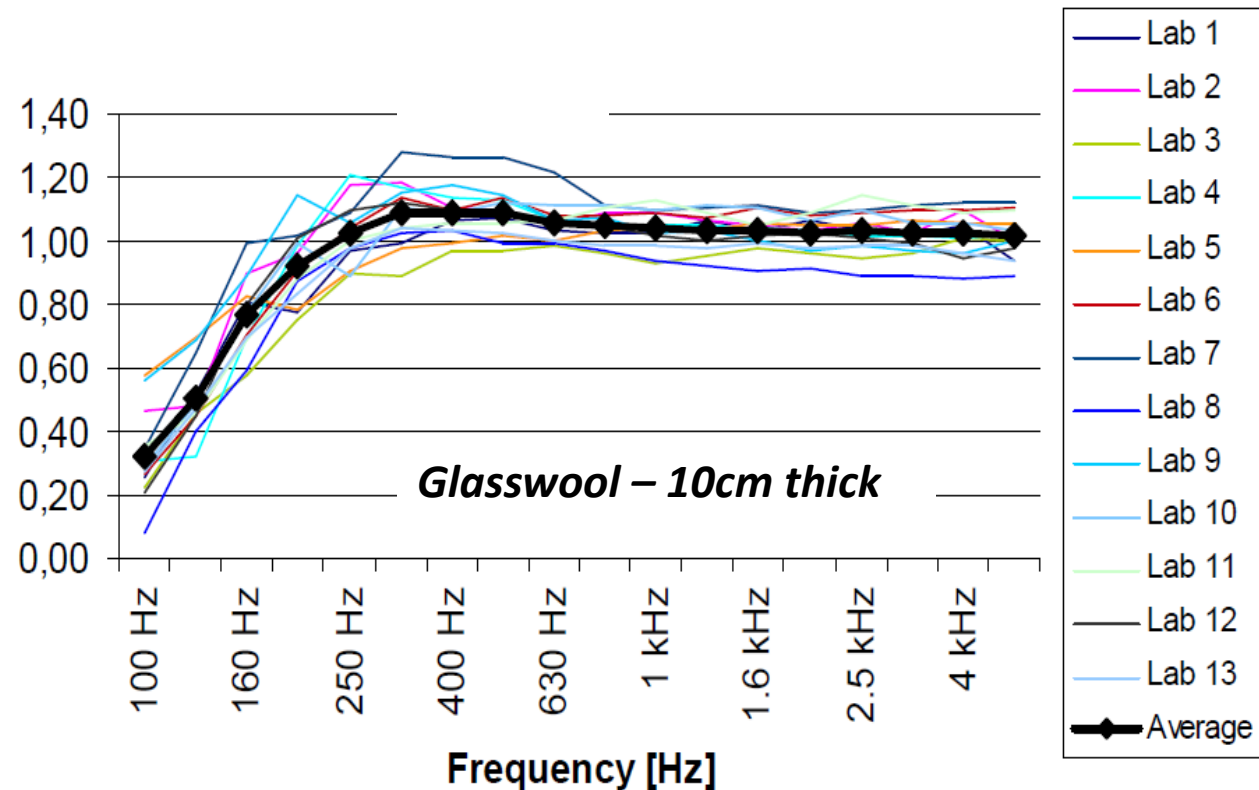
This paper contains a report of work on sound absorption where large areas of absorbent material are installed. The measurements show that under these conditions it is impossible to obtain a logarithmic decay, hence the sound absorption is less than would be expected from the absorption coefficient of the material.

Measurements were also made on very small areas. In this case the absorption was more than would be expected from the coefficient determined by measuring the absorption of an area of 72 square feet.

Introduction (...)

Difficulté 3: Grande dispersion inter-laboratoires

From Vercammen, ISRA2010



Difficulté 4: La méthode ne s'applique pas *in situ*

Approche par synthèse de champ (1/4)

Source ponctuelle de débit volumique q_i et doublet microphonique ($M1 - M2$)

- Au microphone j , à la position i de la source source,

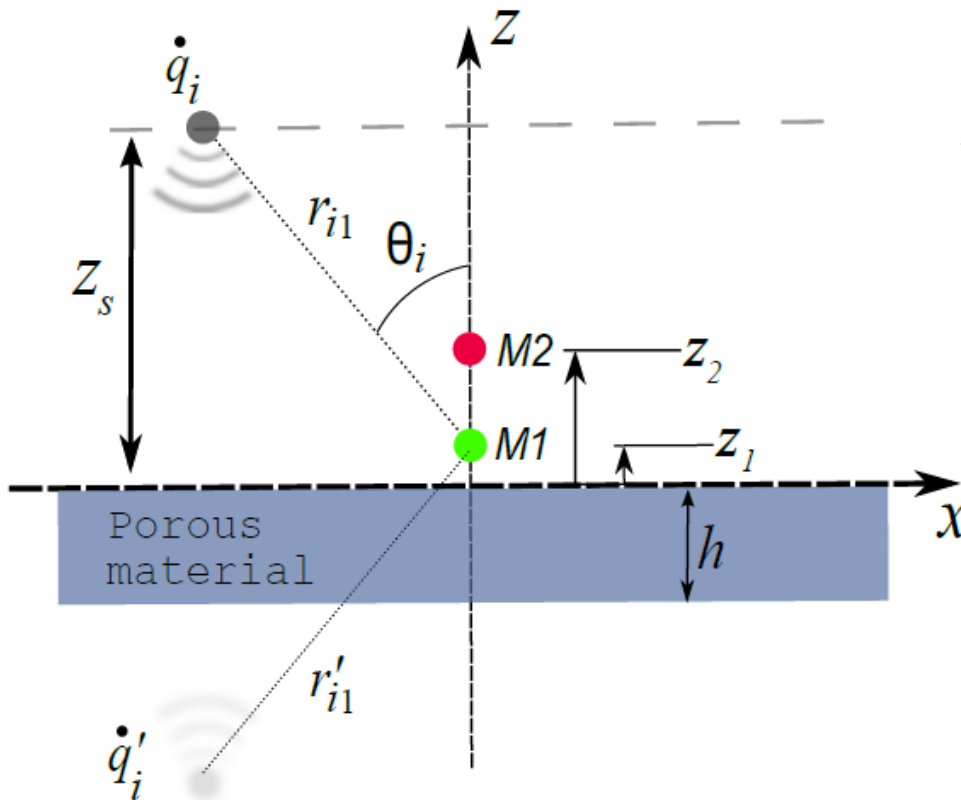
$$\tilde{p}_{ij}(\theta_i, \omega) = \rho_0 \dot{q}_i(\omega) \frac{e^{-jk_0 r_{ij}}}{r_{ij}} + R(\theta_i, \omega) \rho_0 \dot{q}_i(\omega) \frac{e^{-jk_0 r'_{ij}}}{r'_{ij}}$$

- En définissant $H(\theta_i, \omega) = \tilde{p}_{i2}/\tilde{p}_{i1}$, le coefficient de réflexion $R(\theta_i, \omega)$ peut être déduit:

$$R(\theta_i, \omega) = \frac{\frac{e^{-jk_0 r_{i2}}}{r_{i2}} - H(\theta_i, \omega) \frac{e^{-jk_0 r_{i1}}}{r_{i1}}}{H(\theta_i, \omega) \frac{e^{-jk_0 r'_{i1}}}{r'_{i1}} - \frac{e^{-jk_0 r'_{i2}}}{r'_{i2}}}$$

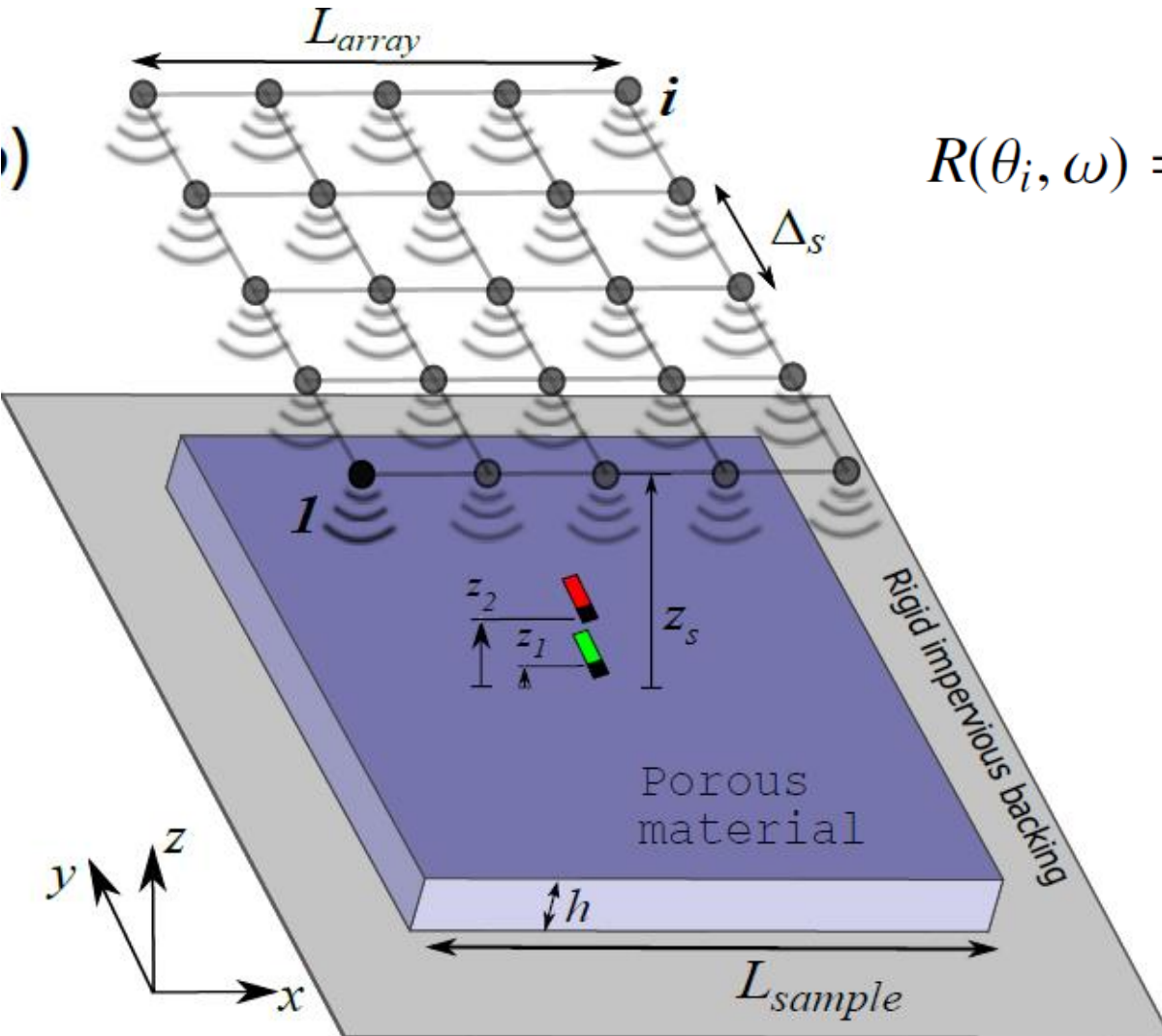
➡ Coefficient d'absorption

$$\alpha(\theta_i, \omega) = 1 - |R(\theta_i, \omega)|^2$$



Approche par synthèse de champ (2/4)

La mesure est répétée pour un doublet fixe et une source mobile



$$R(\theta_i, \omega) = \frac{\frac{e^{-jk_0 r_{i2}}}{r_{i2}} - H(\theta_i, \omega) \frac{e^{-jk_0 r_{i1}}}{r_{i1}}}{H(\theta_i, \omega) \frac{e^{-jk_0 r'_{i1}}}{r'_{i1}} - \frac{e^{-jk_0 r'_{i2}}}{r'_{i2}}}$$

↪ Antenne virtuelle de monopôles à proximité du matériau

↪ Base de donnée de coefficients de réflexion sous monopôle

Approche par synthèse de champ (3/4)

- On note $g_{ij}(\omega) = \frac{e^{jk_0 r_{ij}}}{r_{ij}}$ (respectivement $g_{ij}'(\omega) = \frac{e^{jk_0 r_{ij}'}}{r_{ij}'}$) les fonctions de Green entre la source i (la source image i) et le microphone j .
- La pression acoustique observée par le microphone 1 sous l'effet simultané de toutes les sources correspond à

$$\tilde{p}_1(\omega) = \sum_i \rho_0 \dot{q}_i g_{ij}(\omega) + \sum_i R(\theta_i, \omega) \rho_0 \dot{q}_i g_{ij}'(\omega) = \dot{\mathbf{Q}}^T \mathbf{g}_1 + \dot{\mathbf{Q}}^T \mathbf{h}_1$$

où $\dot{\mathbf{Q}} = \{\dots \dot{q}_i \dots\}^T$, $\mathbf{g}_1 = \{\dots \rho_0 g_{i1}(\omega) \dots\}^T$, $\mathbf{h}_1 = \{\dots R(\theta_i, \omega) \rho_0 g_{i1}'(\omega) \dots\}^T$

- Par ailleurs

$$\tilde{p}_1(\omega) = \sum_i \rho_0 \dot{q}_i g_{ij}(\omega) + R_{synth}(\omega) \sum_i \rho_0 \dot{q}_i g_{ij}'(\omega) = \dot{\mathbf{Q}}^T \mathbf{g}_1 + R_{synth}(\omega) \dot{\mathbf{Q}}^T \mathbf{g}_1'$$

Où $\mathbf{g}_1' = \{\dots \rho_0 g_{i1}'(\omega) \dots\}^T$

- On en déduit $\dot{\mathbf{Q}}^T \mathbf{h}_1 = R_{synth}(\omega) \dot{\mathbf{Q}}^T \mathbf{g}_1'$.

Approche par synthèse de champ (4/4)

- Si l'on considère la densité spectrale de puissance des quantités apparaissant à gauche et à droite de l'équation précédente,

$$\mathbf{h}_1^H \mathbf{S}_{\dot{\mathbf{Q}}\dot{\mathbf{Q}}} \mathbf{h}_1 = \|R_{synth}(\omega)\|^2 \mathbf{g}_1'^H \mathbf{S}_{\dot{\mathbf{Q}}\dot{\mathbf{Q}}} \mathbf{g}_1',$$

où $\mathbf{S}_{\dot{\mathbf{Q}}\dot{\mathbf{Q}}}$ est la matrice des densités interspectrales des accélérations volumiques des sources. On en déduit alors la relation :

$$\|R_{synth}(\omega)\|^2 = \frac{\mathbf{g}_1'^H \mathbf{S}_{\dot{\mathbf{Q}}\dot{\mathbf{Q}}} \mathbf{g}_1'}{\mathbf{h}_1^H \mathbf{S}_{\dot{\mathbf{Q}}\dot{\mathbf{Q}}} \mathbf{h}_1}.$$

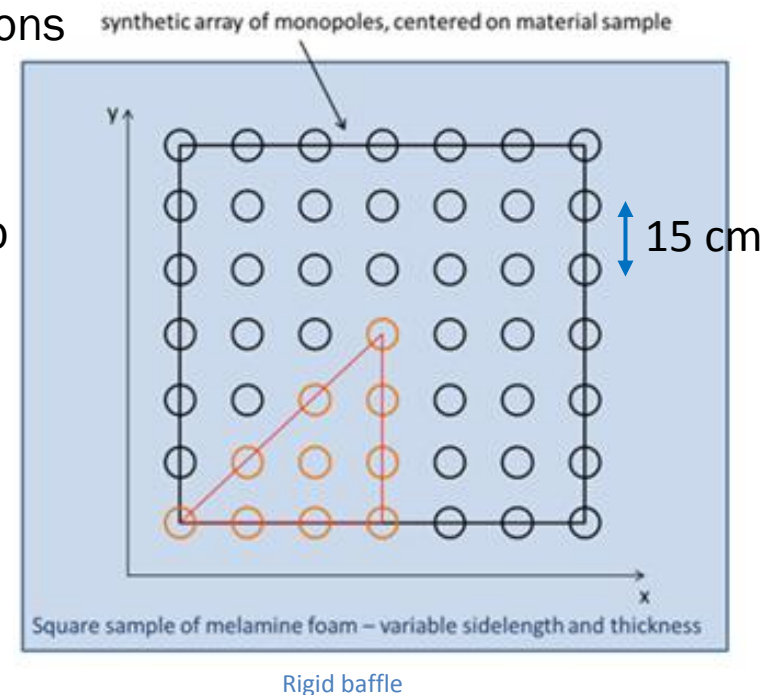
- Le coefficient d'absorption sous champ synthétisé est déduit grâce à la relation

$$\alpha_{synth}(\omega) = 1 - \|R_{synth}(\omega)\|^2.$$

- Dans les équations précédentes la matrice interspectrale des accélérations volumiques des sources $\mathbf{S}_{\dot{\mathbf{Q}}\dot{\mathbf{Q}}}$ peut être déterminée à partir de différentes approches de synthèse de champs détaillées dans (Berry, Dia, et Robin, 2012; Robin, Berry, et Moreau, 2013) en vue par exemple de créer des conditions de champ diffus incident ou d'ondes planes obliques.

Simulations numériques

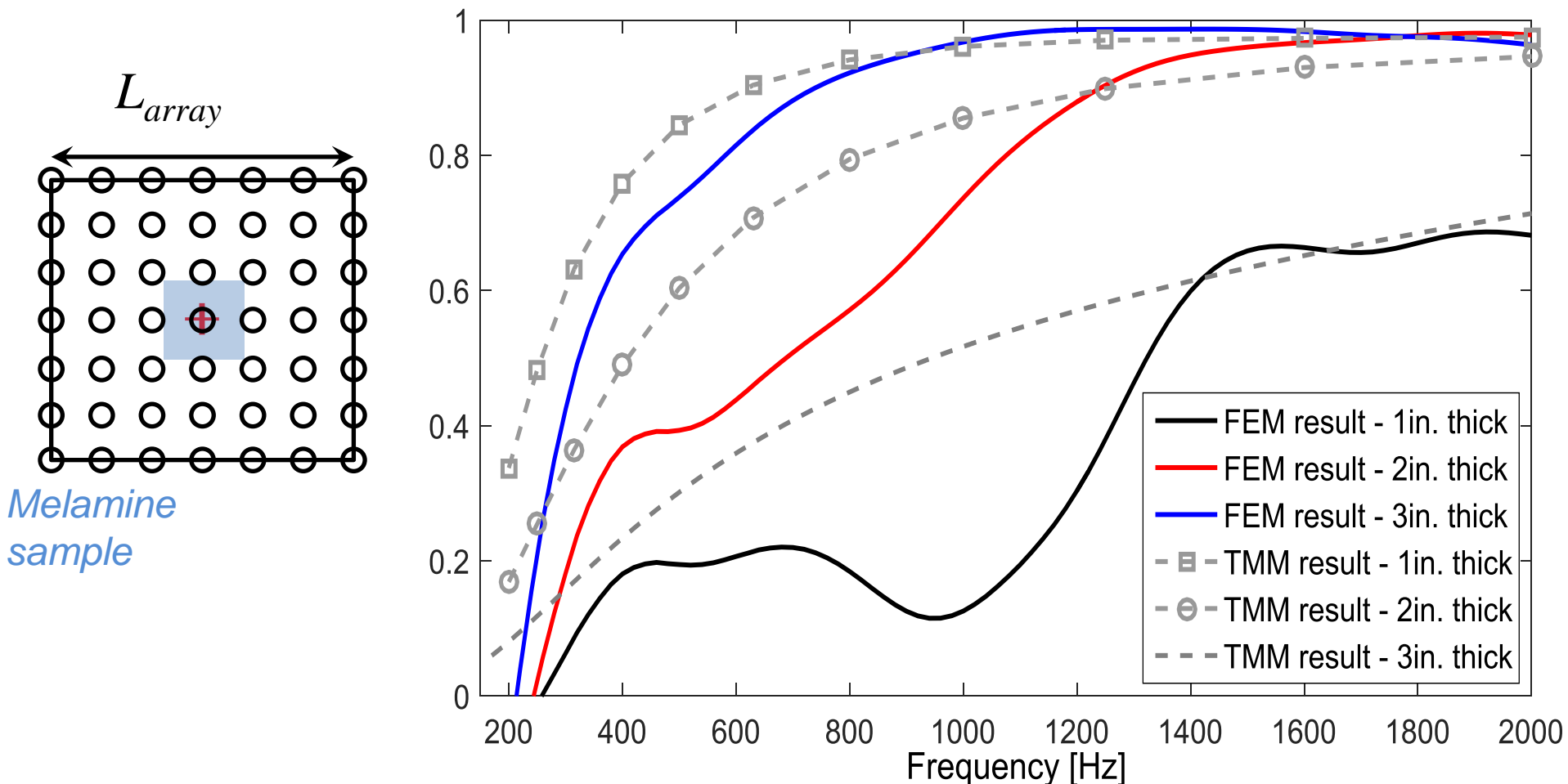
- Objectifs:
 - Valeurs d'absorption de référence (« Transfer Matrix Method ») sous champ diffus;
 - Simulations par FEM de l'approche expérimentale par synthèse de champs
- Calcul NovaFEM de la pression acoustique aux positions du doublet pour diverses positions de monopoles
- Calcul en post-traitement de l'absorption sous champ diffus "synthétique" selon l'approche proposée
- Matériau = mousse de melamine selon modèle Johnson-Champoux-Allard
- Comparaisons avec calculs TMM sous champ diffus pour un matériau "latéralement" infini



Simulations numériques: effet de taille de l'échantillon

Taille du matériau: 0.22 m

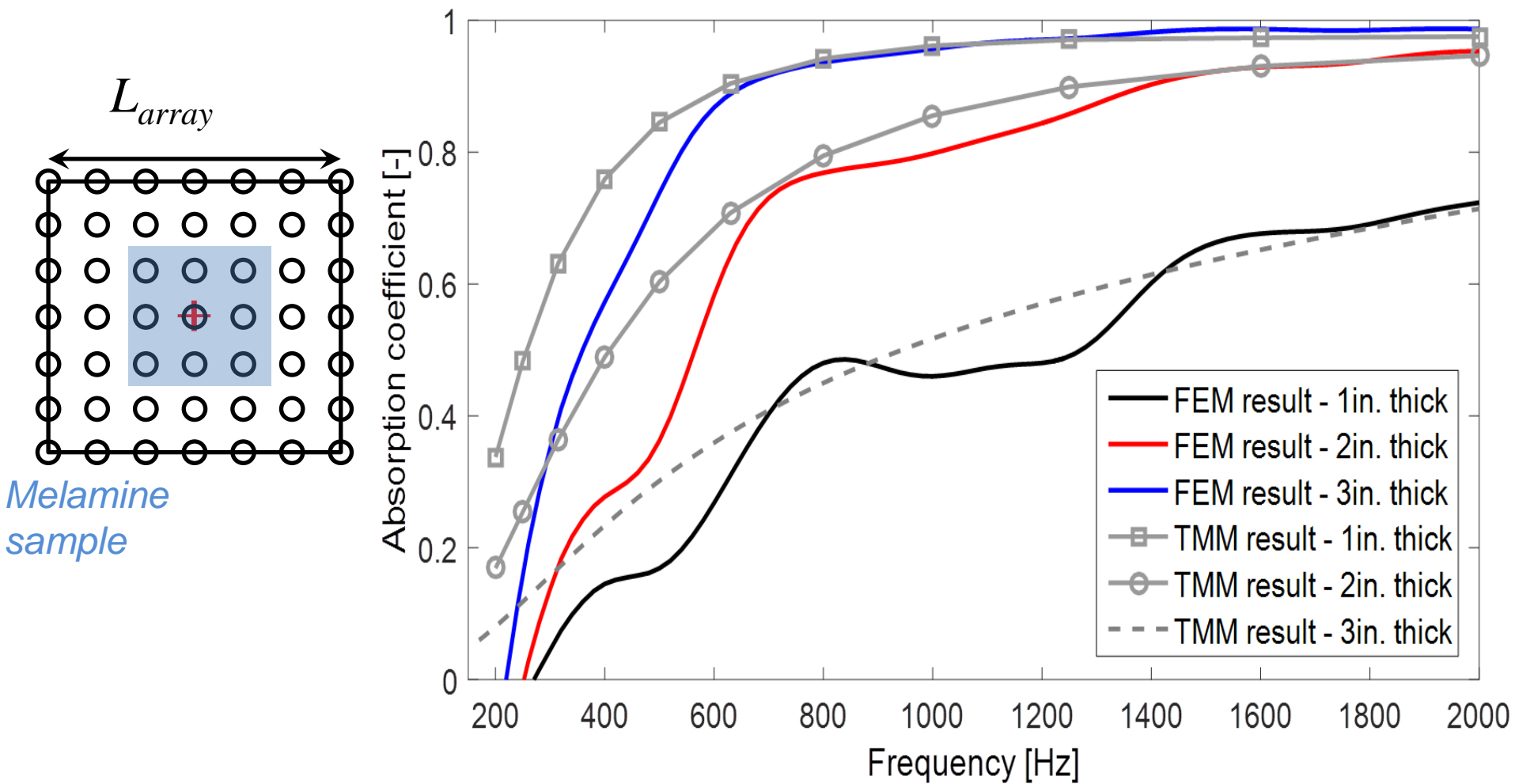
Résultat FEM \equiv simulation numérique de la méthode / TMM \equiv résultat de référence, matériau infini



Simulations numériques: effet de taille de l'échantillon (...)

Taille du matériau: 0.45 m

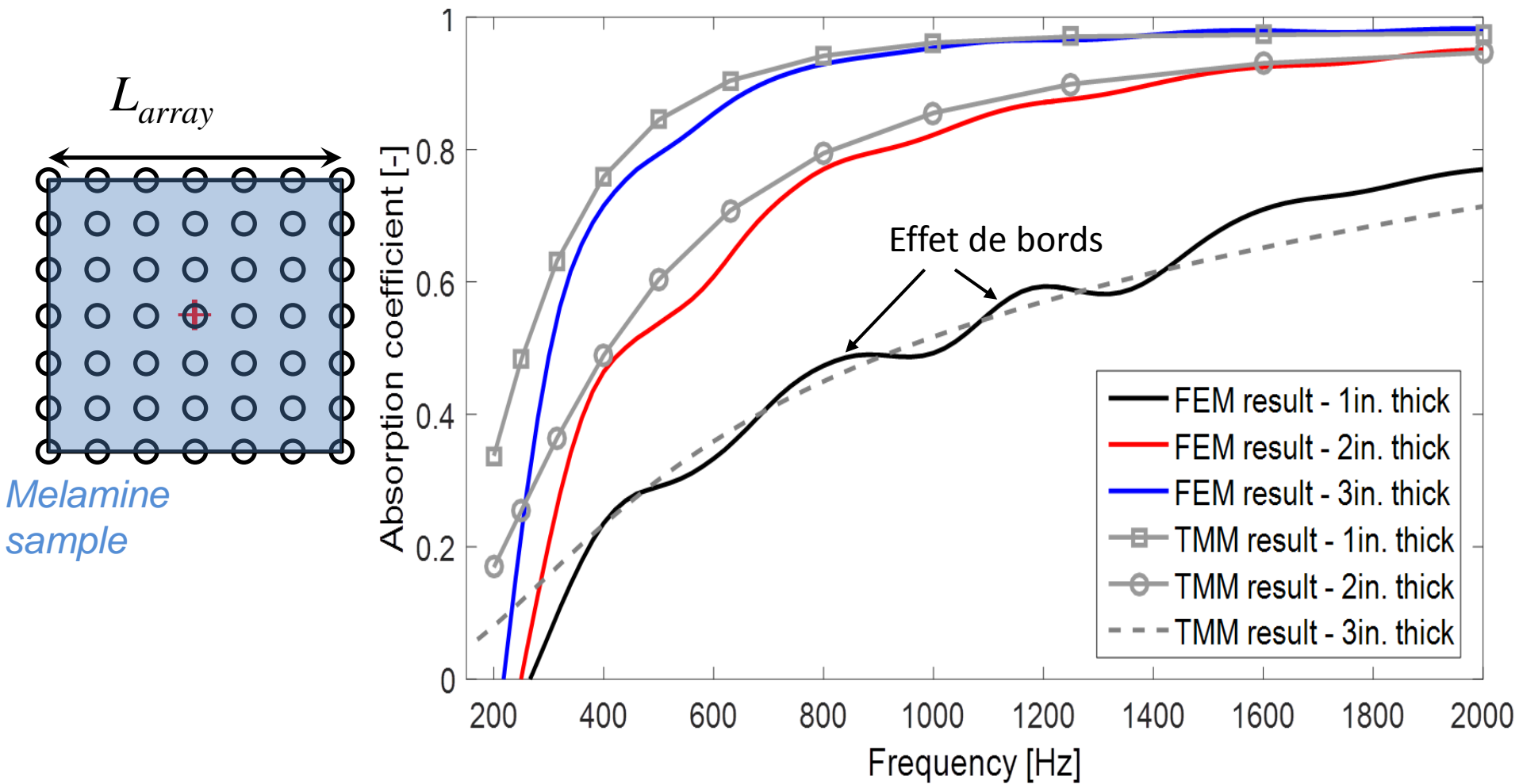
Résultat FEM \equiv simulation numérique de la méthode / TMM \equiv résultat de référence, matériau infini



Simulations numériques: effet de taille de l'échantillon (...)

Taille du matériau: 0.90 m

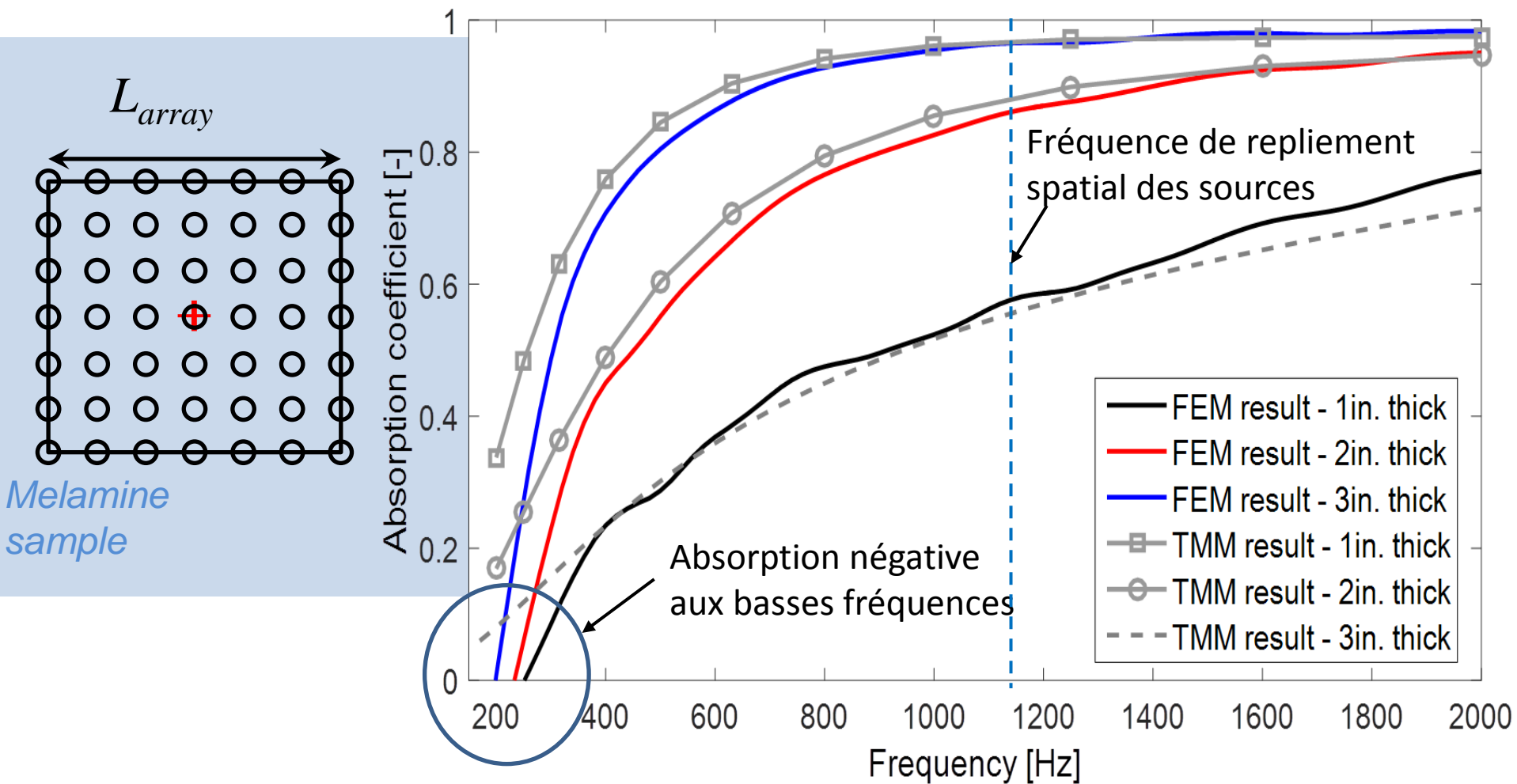
Résultat FEM \equiv simulation numérique de la méthode / TMM \equiv résultat de référence, matériau infini



Simulations numériques: effet de taille de l'échantillon (...)

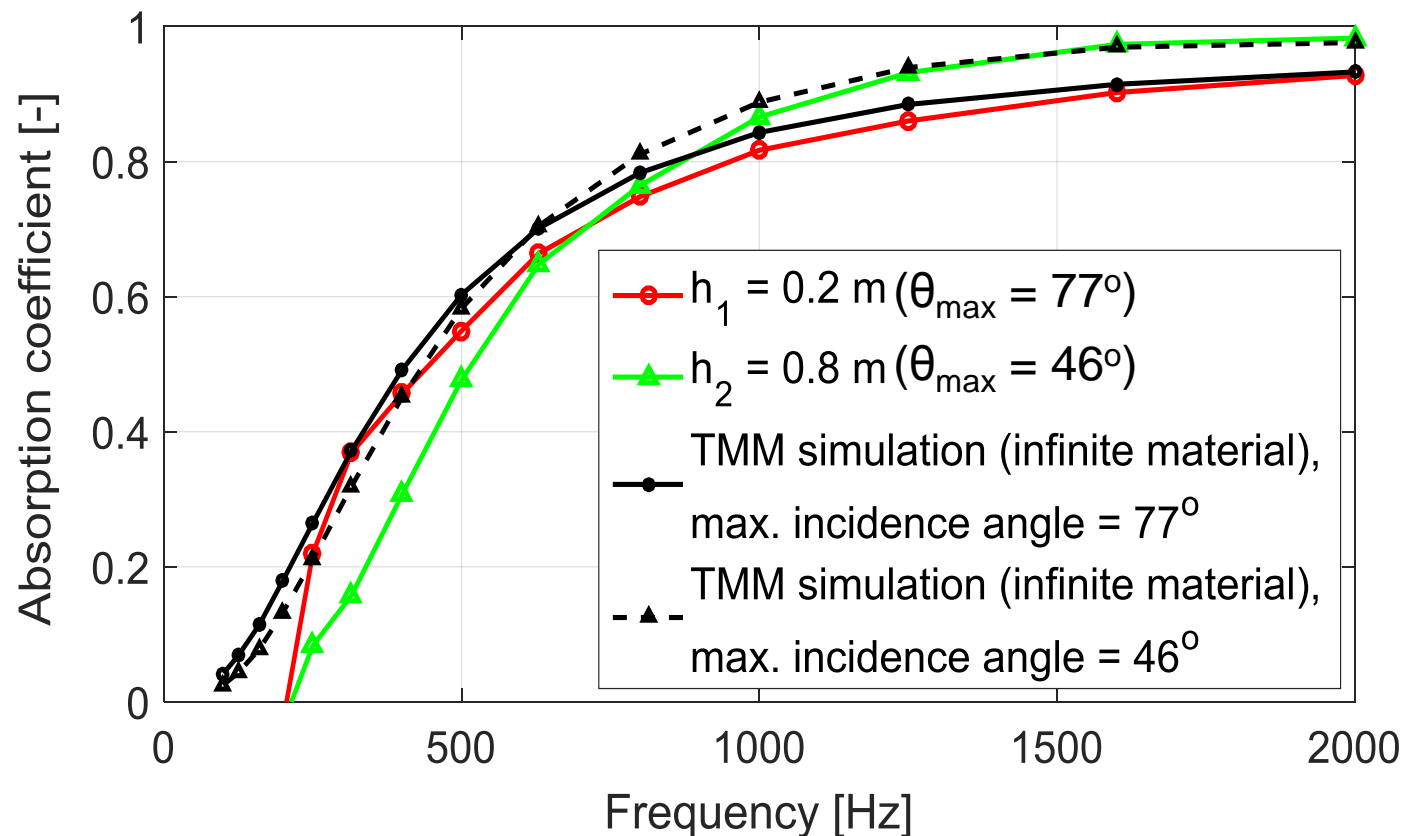
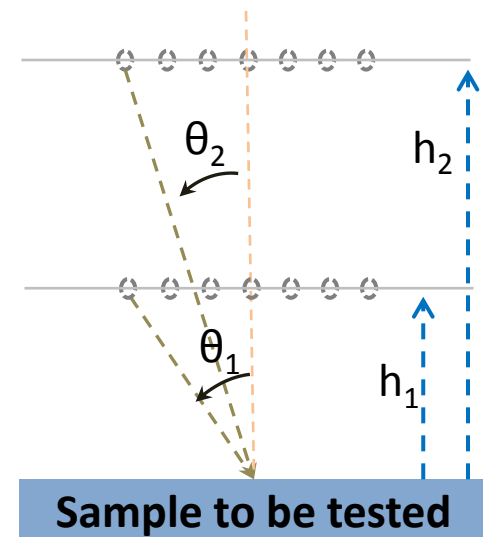
Taille du matériau: 1.80 m

Résultat FEM \equiv simulation numérique de la méthode / TMM \equiv résultat de référence, matériau infini

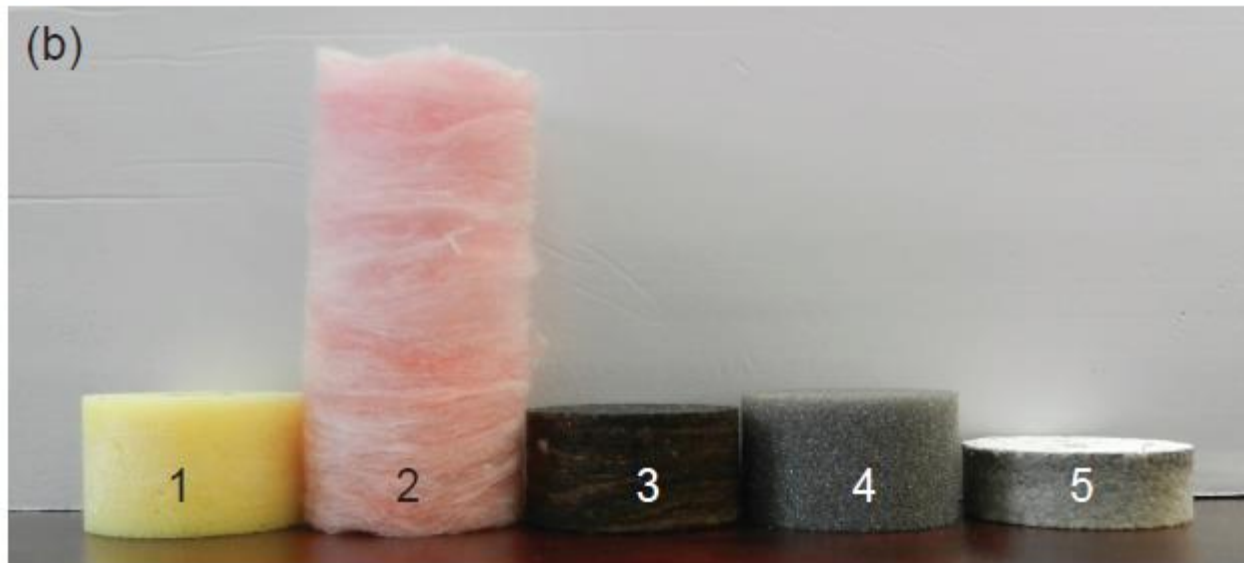


Simulations numériques: hauteur de l'antenne

- Taille constante de l'antenne de sources, 2 hauteurs distinctes
- Mousse de mélamine, 2 pouces
- Antenne de sources 9 x 9, $h_2 > h_1$, $\theta_2 < \theta_1$



Mesures: matériaux testés



6: Laine minérale

1: mousse mélamine

2: fibre de verre

3: fibre de verre
comprimée

4: mousse polyuréthane

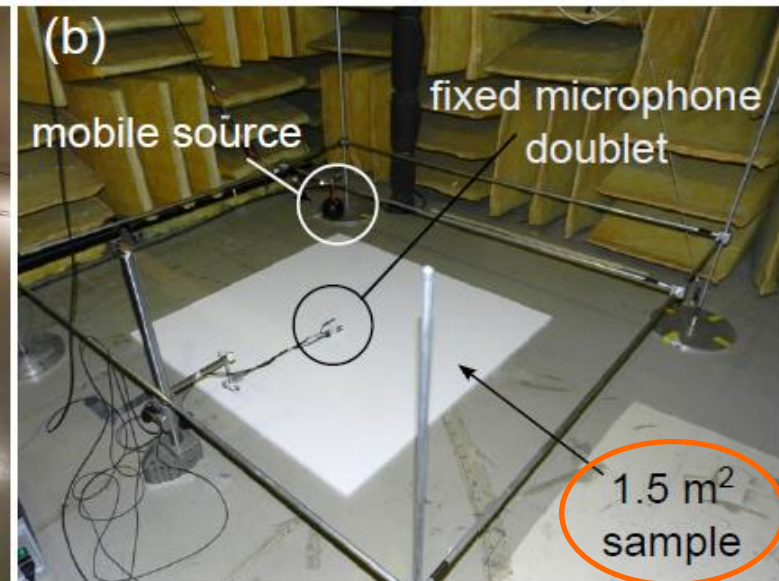
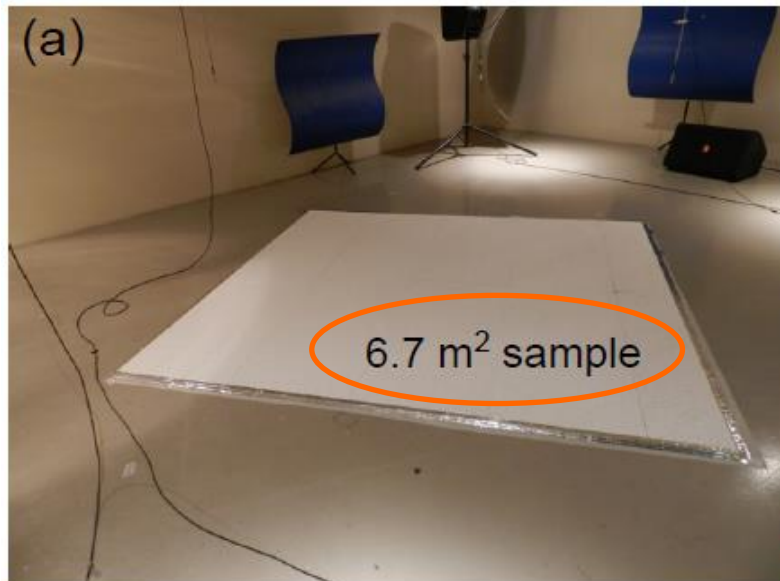
5: tuiles de plafond

Mesures: matériaux testés

Paramètres physiques pour modèle JCA / TMM

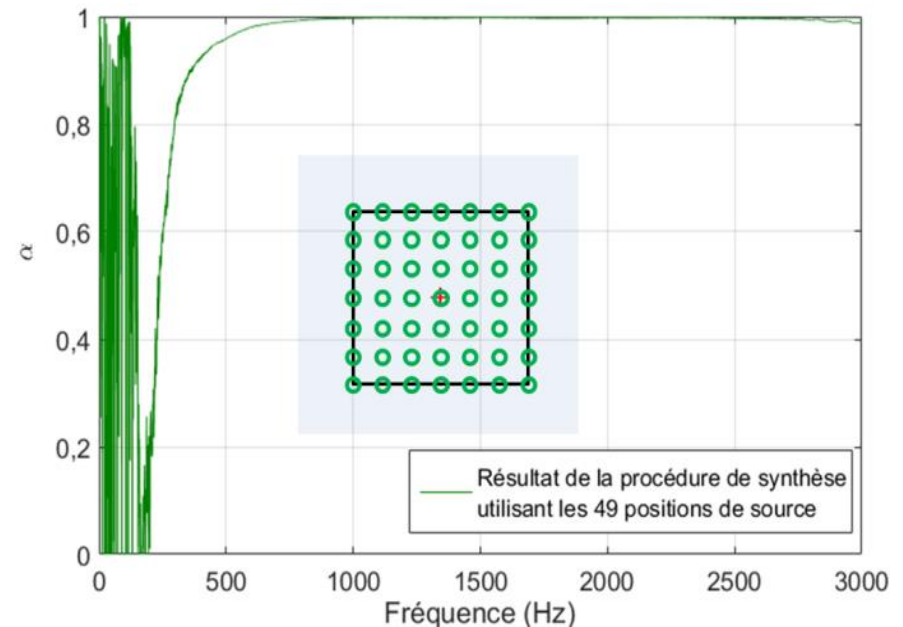
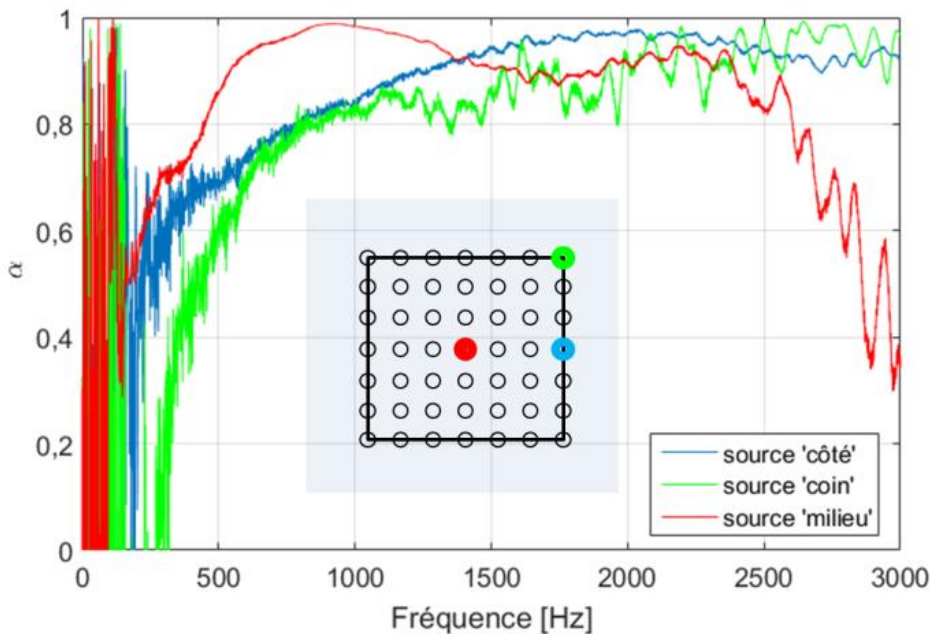
Material	Tortuosity α_∞ [-]	Porosity ϕ [-]	Resistivity σ [Nm ⁻⁴ s]	Viscous length Λ [μ m]	Thermal length Λ' [μ m]	Foam mass density ρ_1 [kg.m ⁻³]
Melamine foam	1	0.98	7920	132	149	6.1
Fiberglass	1	0.99	4860	225	388	10
HDFB	1	0.96	22200	57	115	66
PU foam	2.95	0.96	9770	123	227	29.8
Tiles	> 4	0.82	> 1e6	25	60	210

Mesures: en chambre réverbérante et selon approche proposée (antenne 7 x 7 sinus glissant, $\Delta l = 15\text{cm}$, $h=20\text{cm}$)



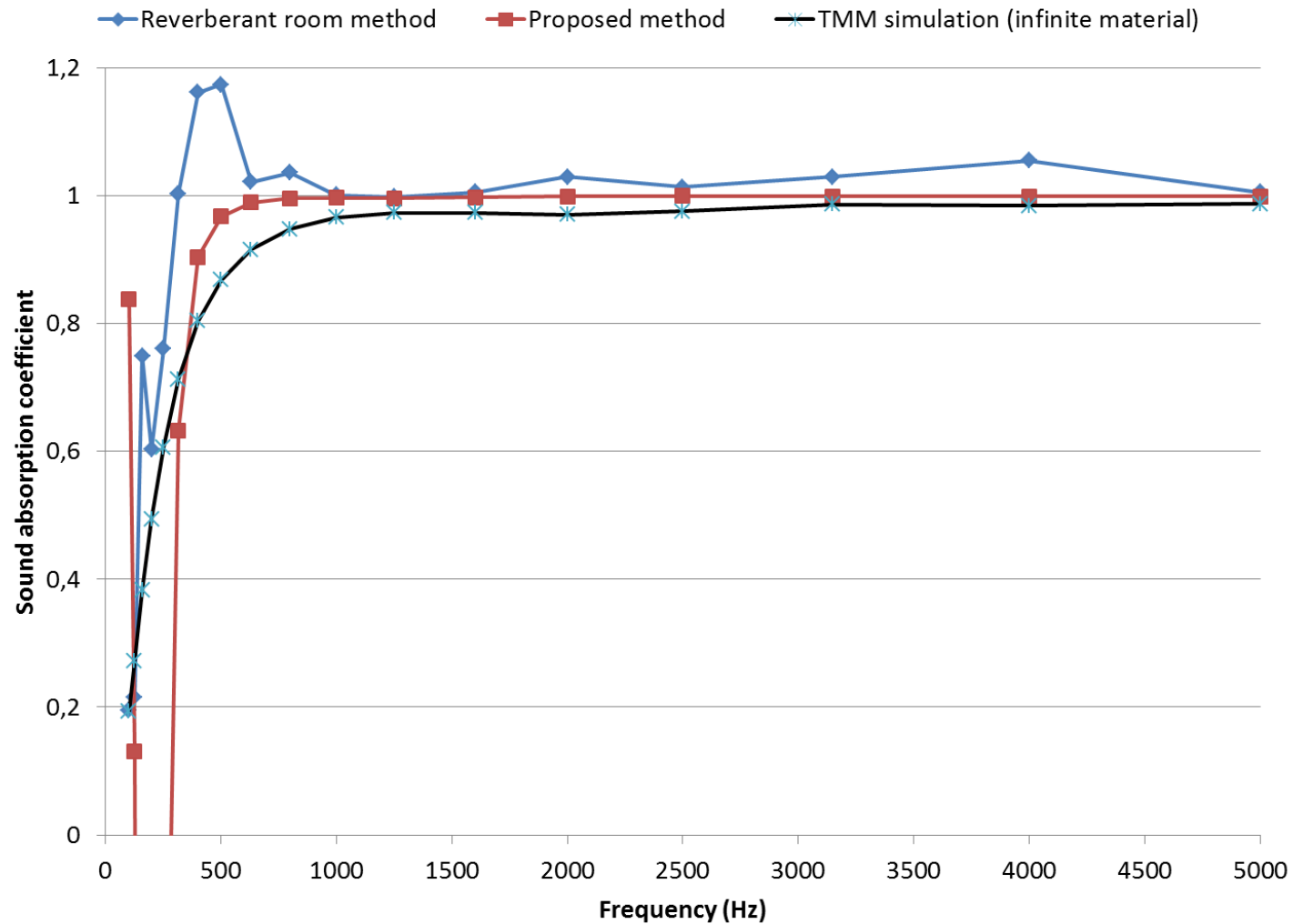
Mesures: résultats

Laine minérale, effet de la procédure de synthèse



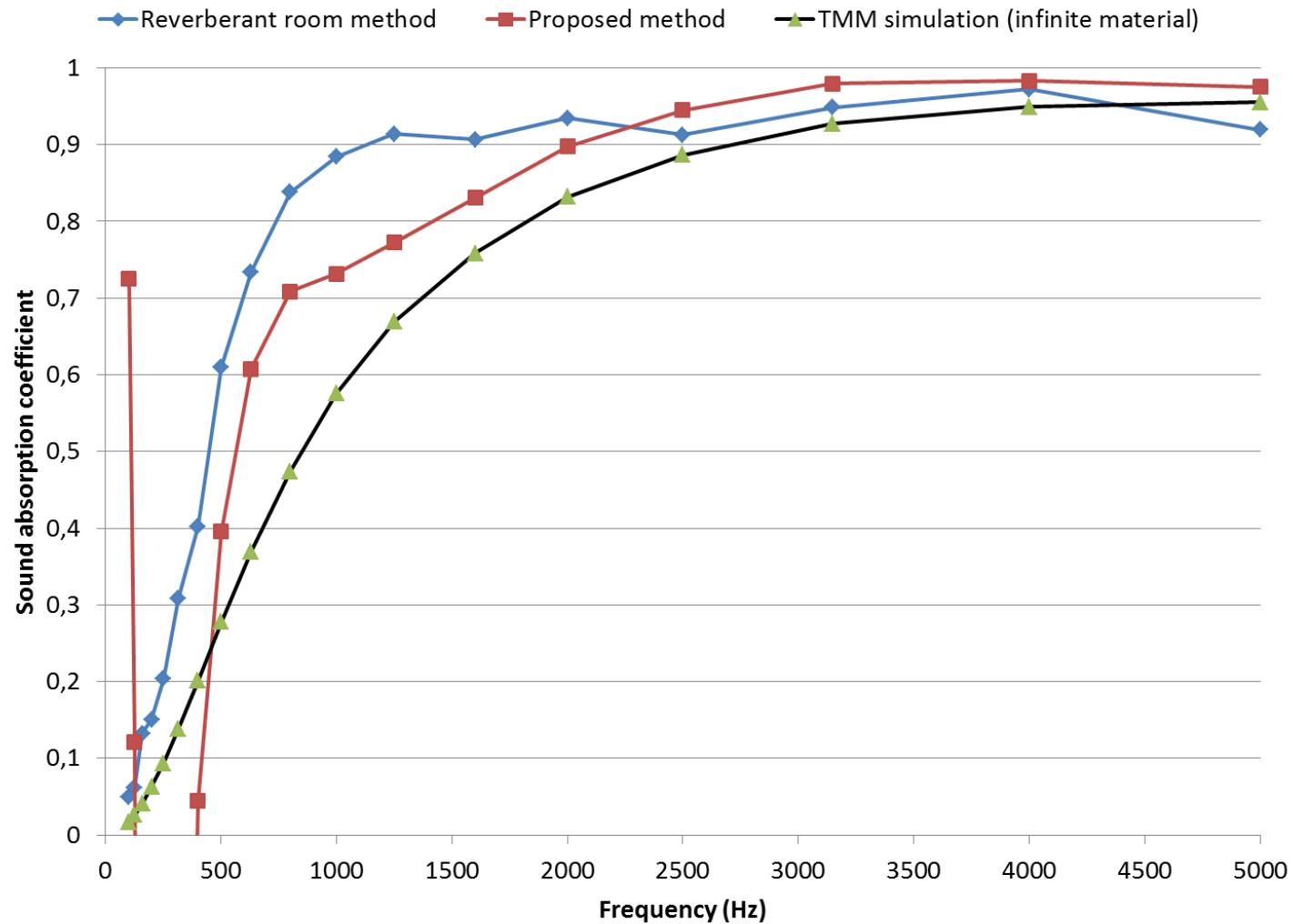
Mesures: résultats

Matériau 2: Fibre de verre



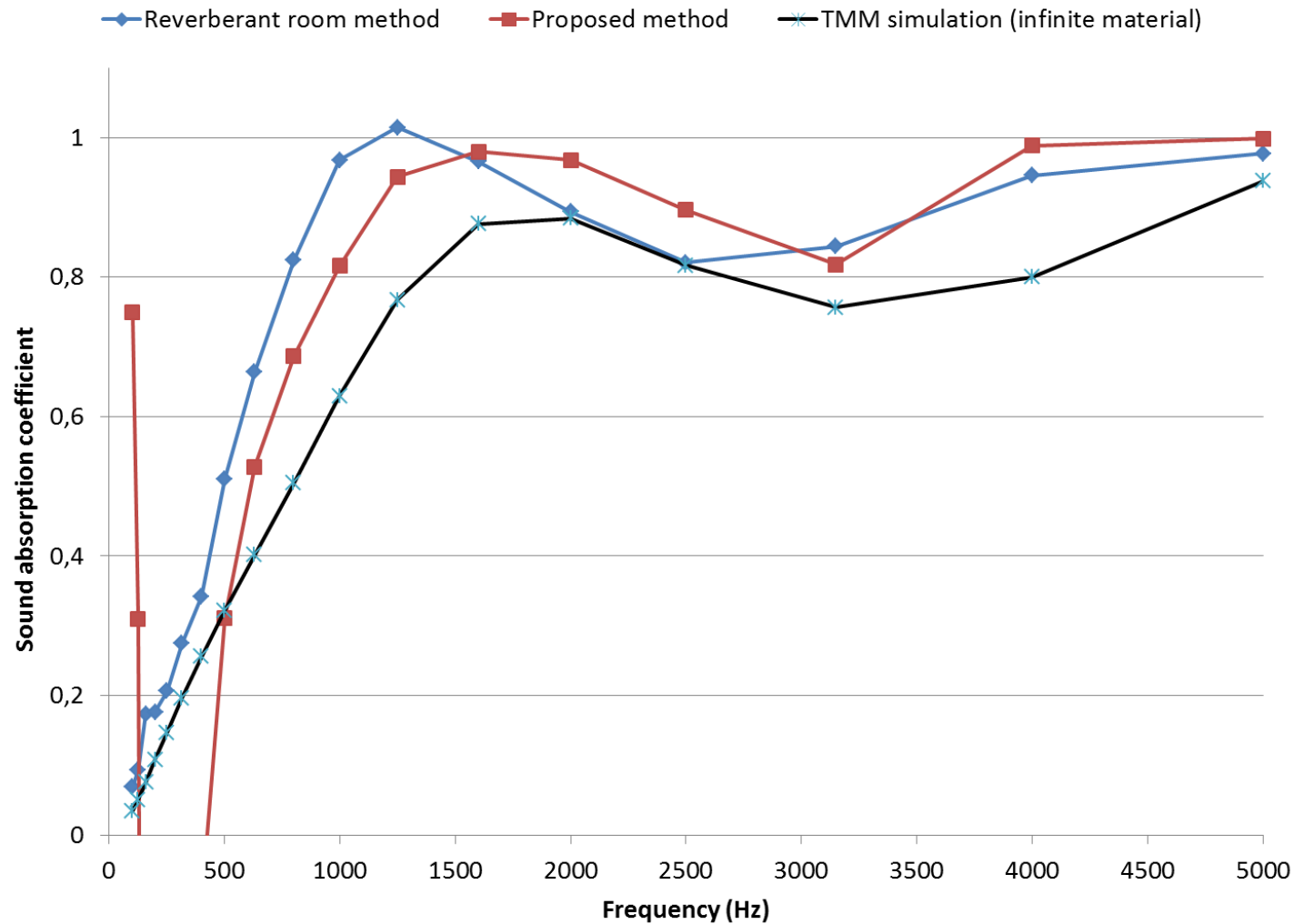
Mesures: résultats

Matériau 3: Panneau de fibre de verre comprimée



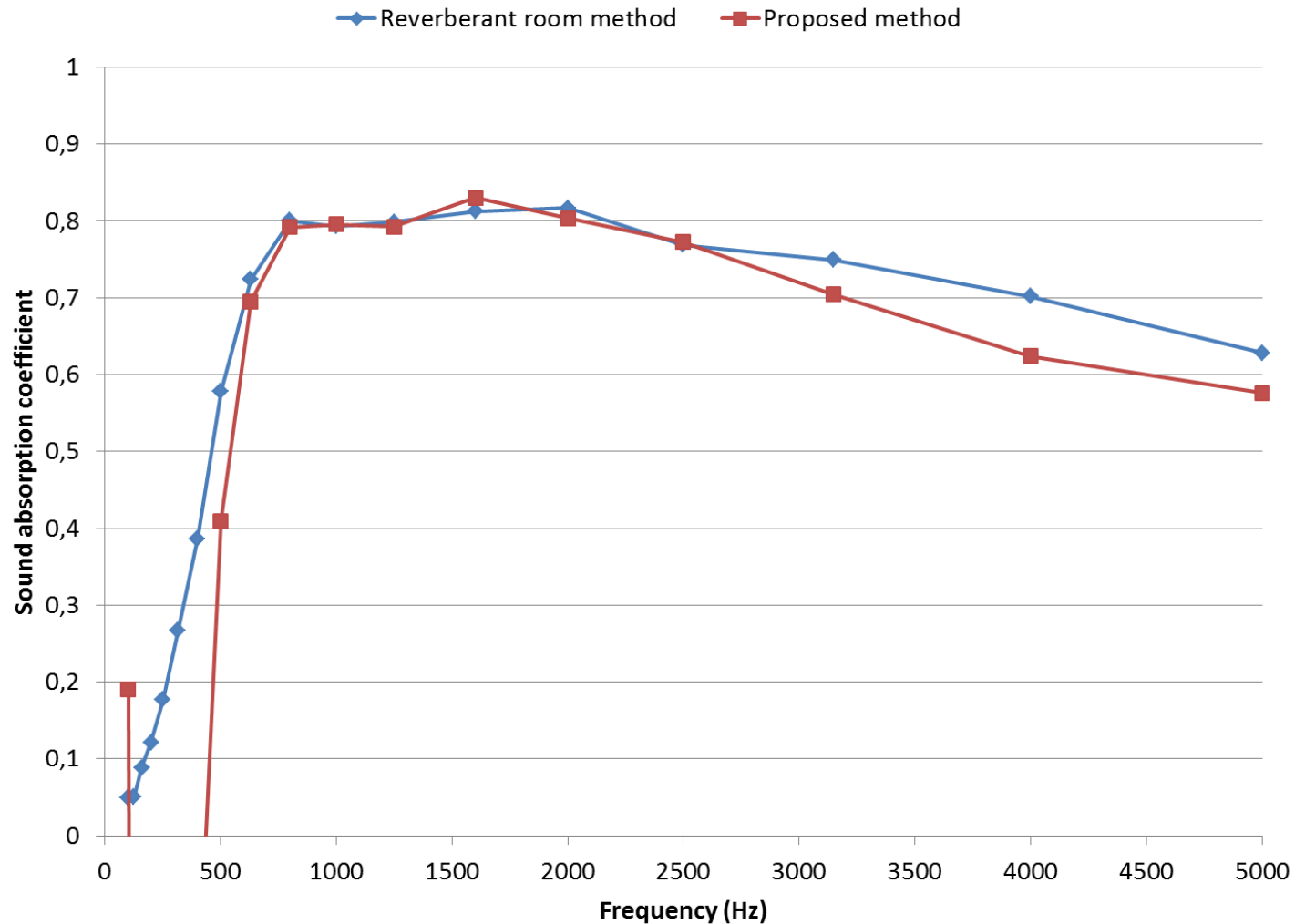
Mesures: résultats

Matériau 4: mousse polyuréthane



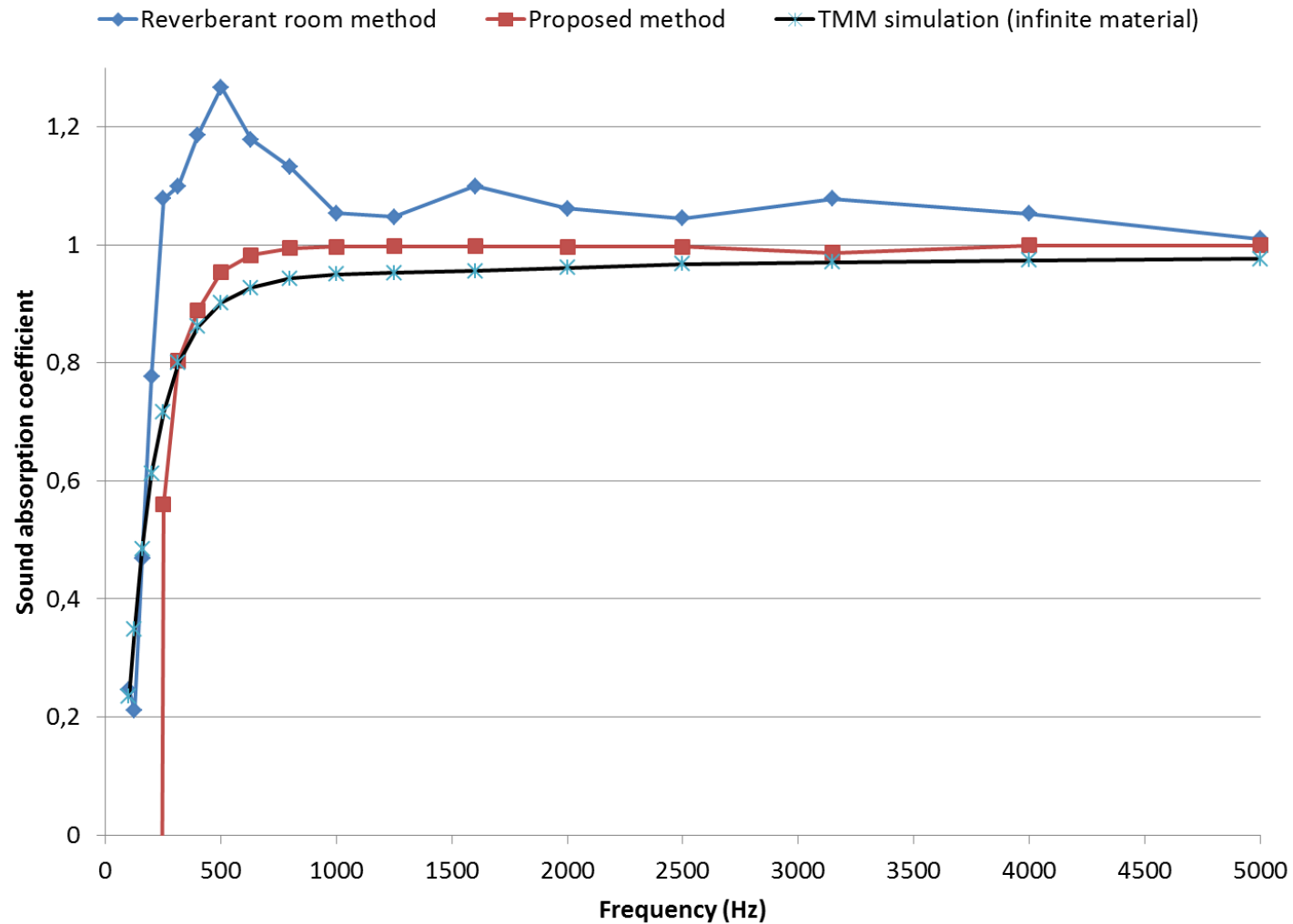
Mesures: résultats

Matériau 5: Tuiles de plafond



Mesures: résultats

Matériau 6: laine minérale

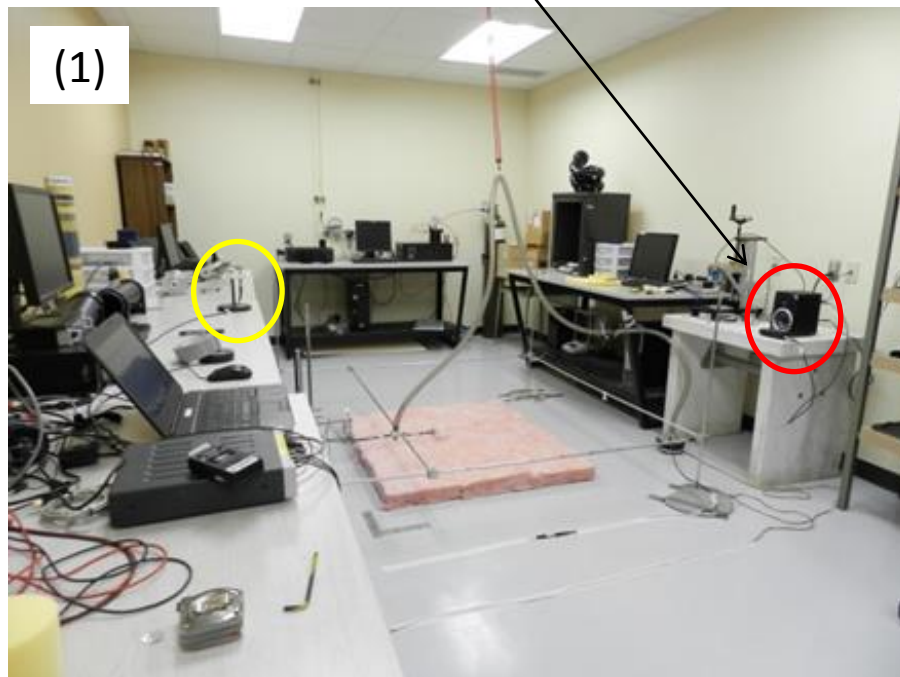


Mesures hors laboratoire

2 environnements « réalistes »:

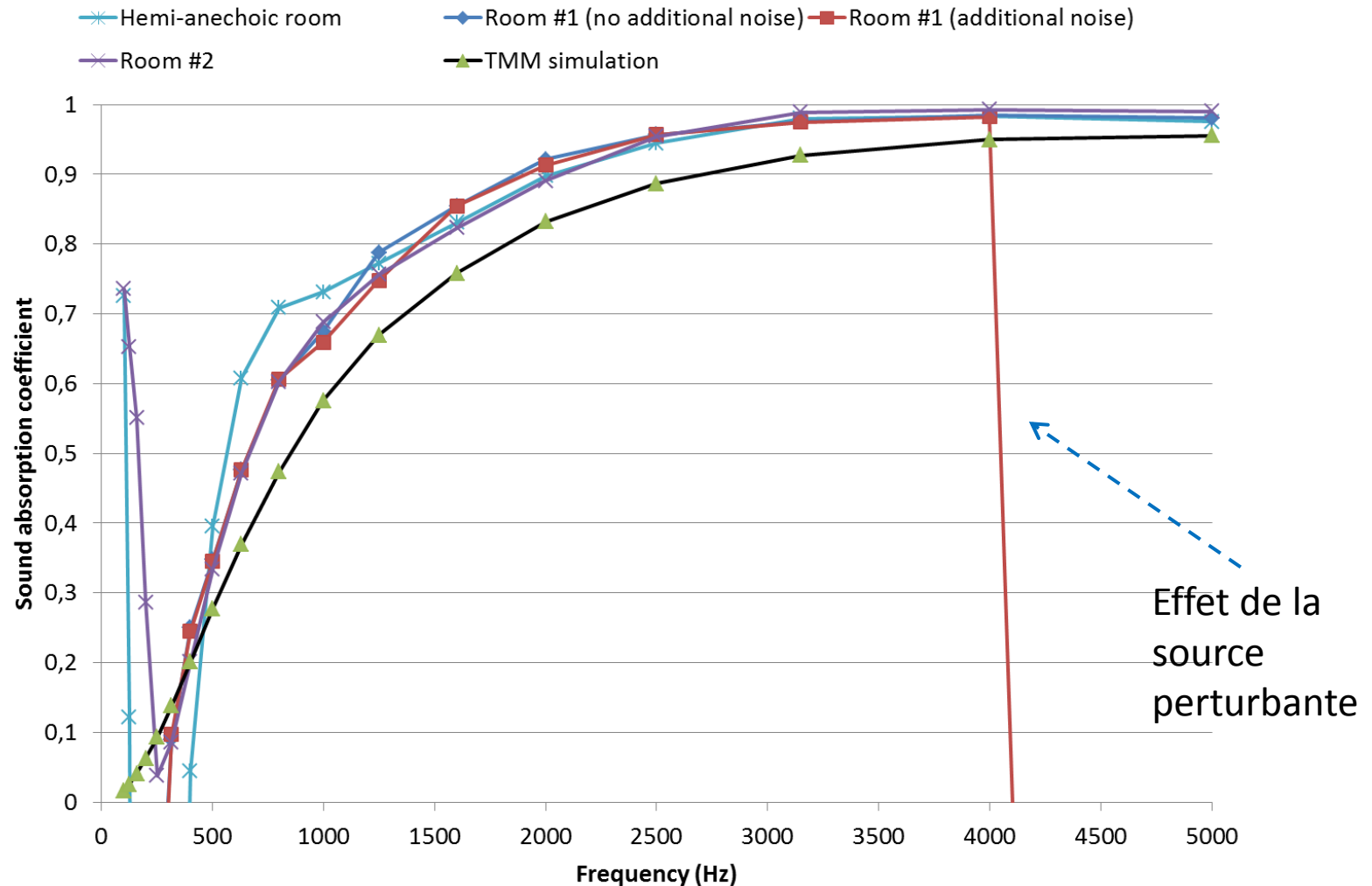
- (1) Espace de travail, 100 m^3 -> Faible temps de réverbération, surfaces réfléchissantes à proximité de la mesure, bruit de fond faible
- (2) Hall d'usinage, 3500 m^3 -> Temps de reverberation élevé, surfaces réfléchissantes éloignées de la mesure, bruit de fond élevé

Source sonore perturbante



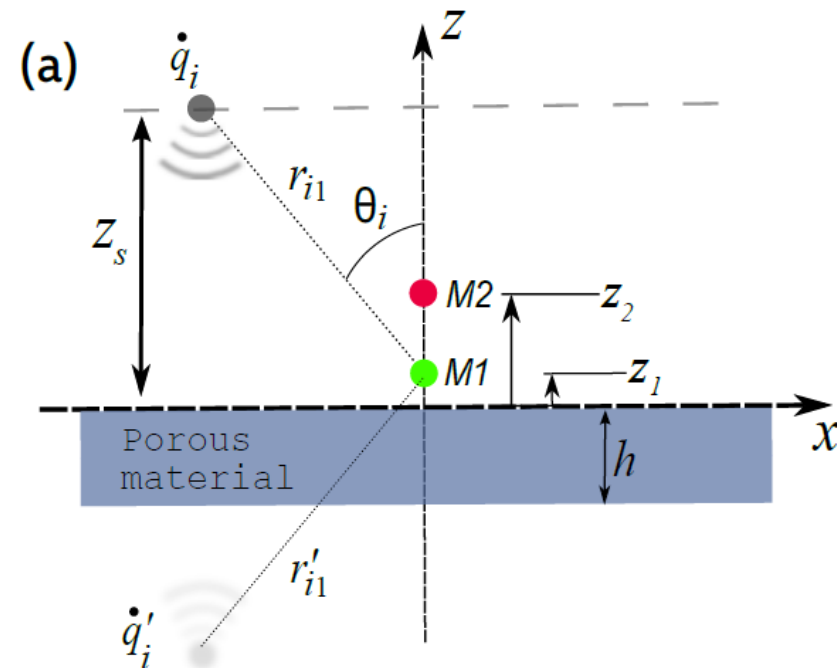
Mesures hors laboratoire

Matériau 3: Panneau de fibre de verre comprimée



Le cas des basses fréquences

Aux basses fréquences, inadéquation du modèle source-image et de $R = \frac{p_{ref}}{p_{inc}}$



Modèle Nobile – Hayek (1970):

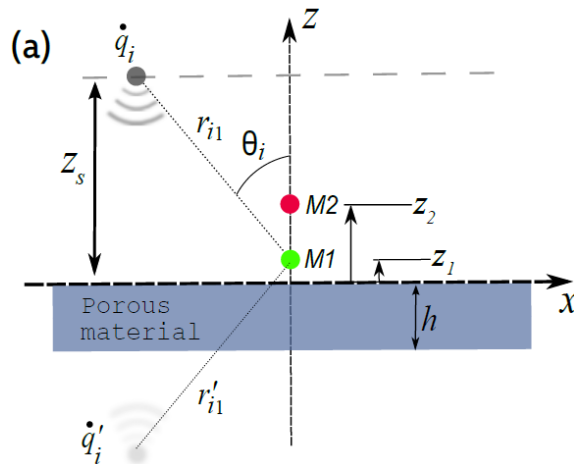
$$\tilde{p}_{ij}(\theta_i, \omega) = \rho_0 \dot{q}_i \left[\frac{e^{jk_0 r_{ij}}}{r_{ij}} + \frac{e^{jk_0 r'_{ij}}}{r'_{ij}} + I_{ij}(\beta, \theta_i, \omega) \right]$$

$$\beta(\omega) = \frac{\rho_0 c_0}{Z(\omega)}: \text{admittance de surface}$$

$$I_{ij}(\beta, \theta_i, \omega) = - \frac{4jk_0 \beta B e^{jk_0 r'_{ij}}}{\beta + \cos \theta_i} \int_0^\infty \frac{e^{jk_0 r'_{ij}(t^2 + 2Bt)}}{\sqrt{1 - \frac{t^2}{H} - \frac{2Bt}{H}}} dt$$

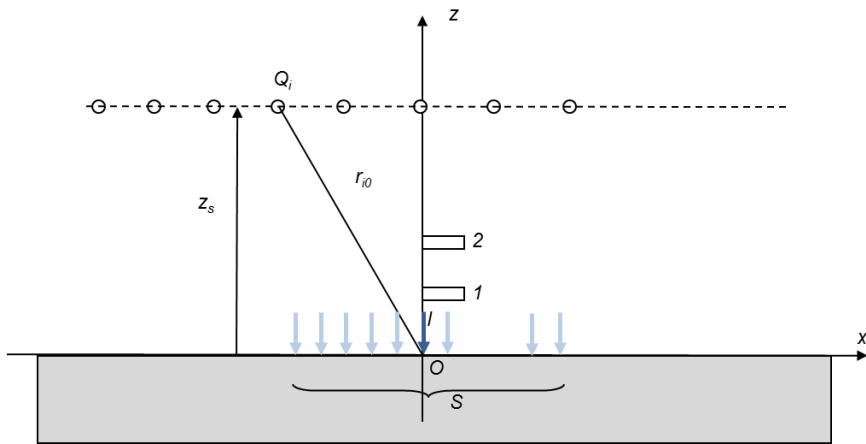
Le cas des basses fréquences (...)

La méthode d'identification du coefficient d'absorption de la couche de matériau selon le modèle N-H procède en 3 étapes :



1. Extraction de l'admittance de surface normalisée $\beta(\theta_i, \omega)$ pour chaque position i de la source à partir de la mesure de $H(\theta_i, \omega) = \tilde{p}_{i2}/\tilde{p}_{i1}$ en inversant le modèle N-H.
2. **Calcul du coefficient de réflexion complexe $R(\theta_i, \omega)$ ou du coefficient d'absorption $\alpha(\theta_i, \omega)$ sous monopôle à partir de $\beta(\theta_i, \omega)$ selon le modèle de Nobile et Hayek.**
3. Calcul du coefficient de réflexion $R_{synth}(\omega)$ ou du coefficient d'absorption $\alpha_{synth}(\omega)$ sous champ synthétisé à partir de $R(\theta_i, \omega)$ ou $\alpha(\theta_i, \omega)$.

Le cas des basses fréquences (...)



Détermination du coefficient d'absorption sous monopôle à partir de la puissance acoustique.

Coefficient d'absorption $\alpha(\theta_i, \omega)$ sous monopôle à partir de $\beta(\theta_i, \omega)$ selon le modèle de Nobile et Hayek:

Bilan de puissance

$$\alpha(\theta_i, \omega) = \frac{\iint_S \operatorname{Re}(\tilde{p}_{i0} \tilde{v}_{i0}^*) ds}{\iint_S \operatorname{Re}(\tilde{p}_{inc} \tilde{v}_{inc}^*) ds}$$

Le cas des basses fréquences (...)

- Comparaison du coefficient d'absorption sous monopôle entre:

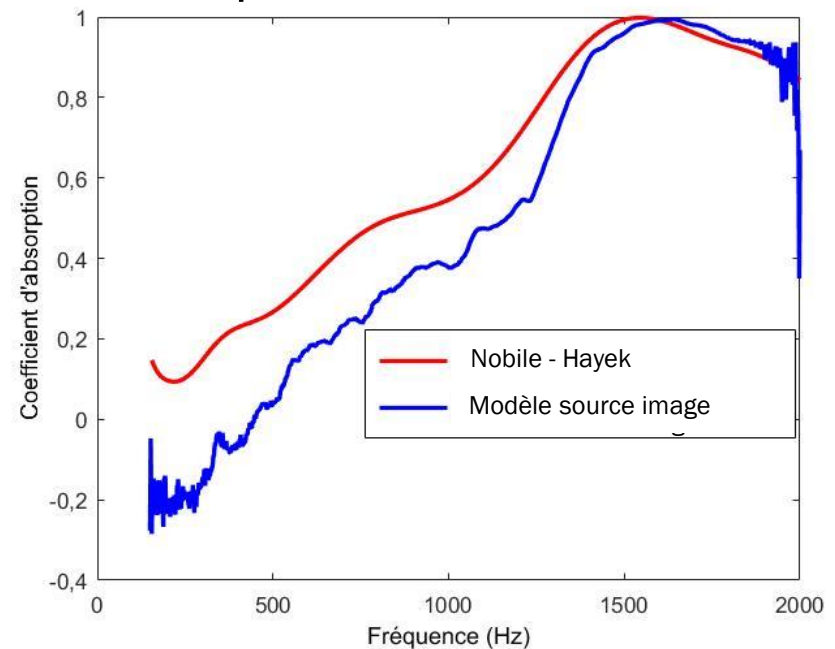
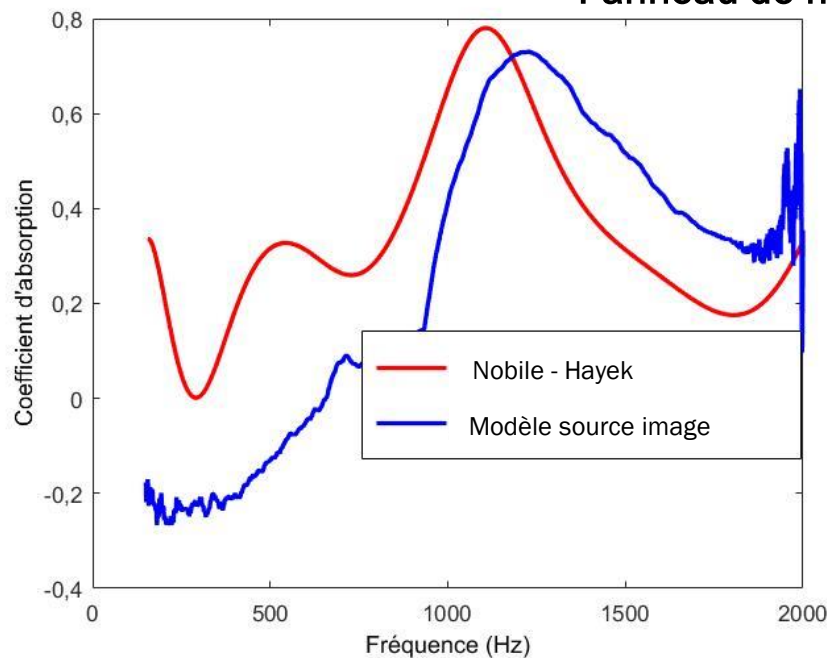
1. Modèle Nobile-Hayek model et bilan de puissance,

2. Modèle source image et $R = \frac{p_{ref}}{p_{inc}}$

1 = incidence normale

2 = incidence oblique

Panneau de fibre de verre comprimée



Le cas des basses fréquences (...)

- Comparaison du coefficient d'absorption sous monopôle entre:

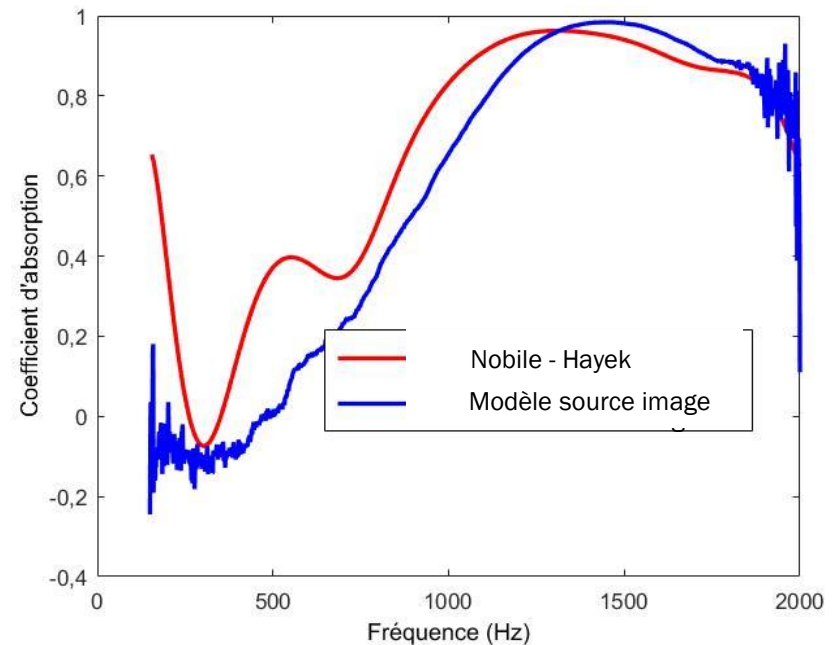
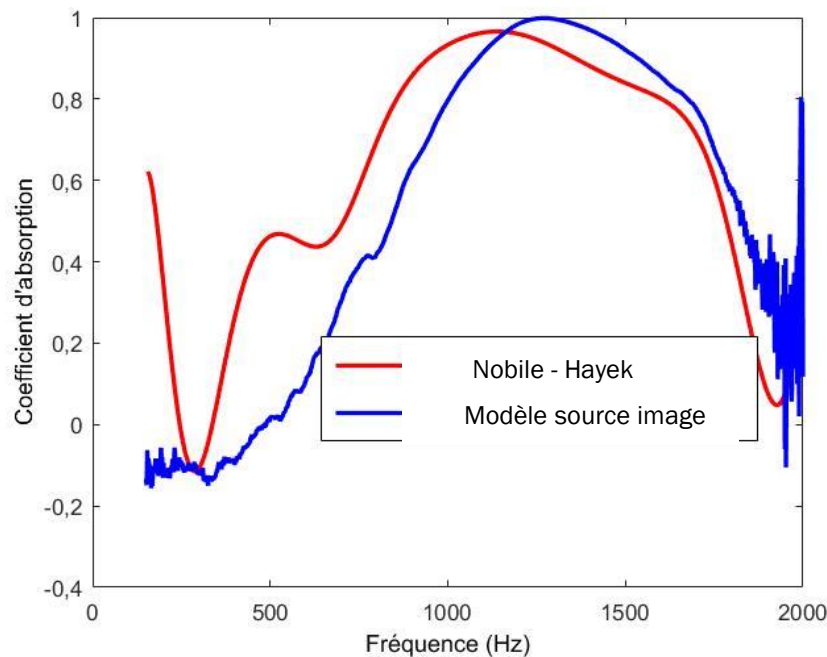
1. Modèle Nobile-Hayek model et bilan de puissance,

2. Modèle source image et $R = \frac{p_{ref}}{p_{inc}}$

1 = incidence normale

2 = incidence oblique

Mousse polyuréthane



Conclusions

- Méthode d'estimation du coefficient d'absorption de traitements absorbants sous champ synthétisé selon principe de l'antenne synthétique (la synthèse se fait en post-traitement, pour tout type de champ incident).
- Mesures en chambre $\frac{1}{2}$ anéchoïque en meilleur accord avec un calcul de référence TMM que mesures en chambre réverbérante
- Taille d'échantillon moindre qu'en chambre réverbérante
- Mesures *in situ* se comparent favorablement aux mesures en chambre $\frac{1}{2}$ anéchoïque
- Améliorations pressenties en BF via l'utilisation d'un modèle plus précis (Nobile-Hayek)



- Thank you for your attention
- Questions ?
- Funding from IRSST is greatly acknowledged
- Enjoy SAPeM 2017