RVS IRSST - 11 décembre 2018

Méthodologie innovante pour la caractérisation des traitements absorbants en laboratoire et étude de son applicabilité sur le terrain

Olivier Robin, Celse Kafui Amédin, Alain Berry, Noureddine Atalla, Olivier Doutres et Franck Sgard

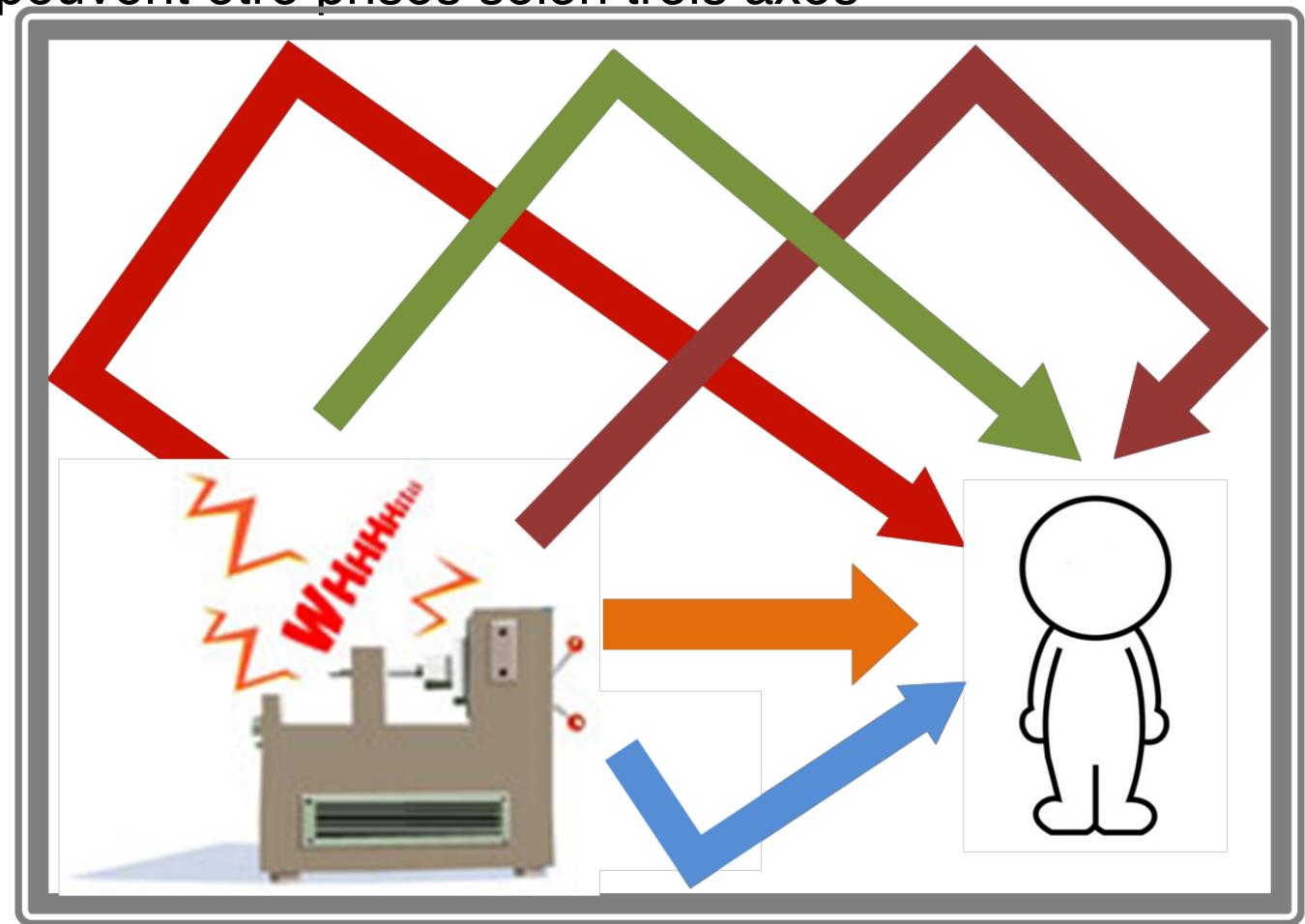




- Environ 500 000 travailleurs québécois sont exposés quotidiennement à des niveaux nocifs de bruit en milieu de travail
- La surdité liée au bruit est placée au premier rang concernant le coût total ainsi que le coût par lésion - le nombre de lésions professionnelles acceptées augmente
- Des niveaux de bruit importants sur les lieux de travail ont un impact direct sur la sécurité des travailleurs (gênent la perception des avertisseurs sonores, la communication avec l'entourage et réduisent la concentration)
- Le bruit au travail (et en général) peut causer un certain nombre de problèmes de santé à court et à long terme selon l'Organisation mondiale de la santé

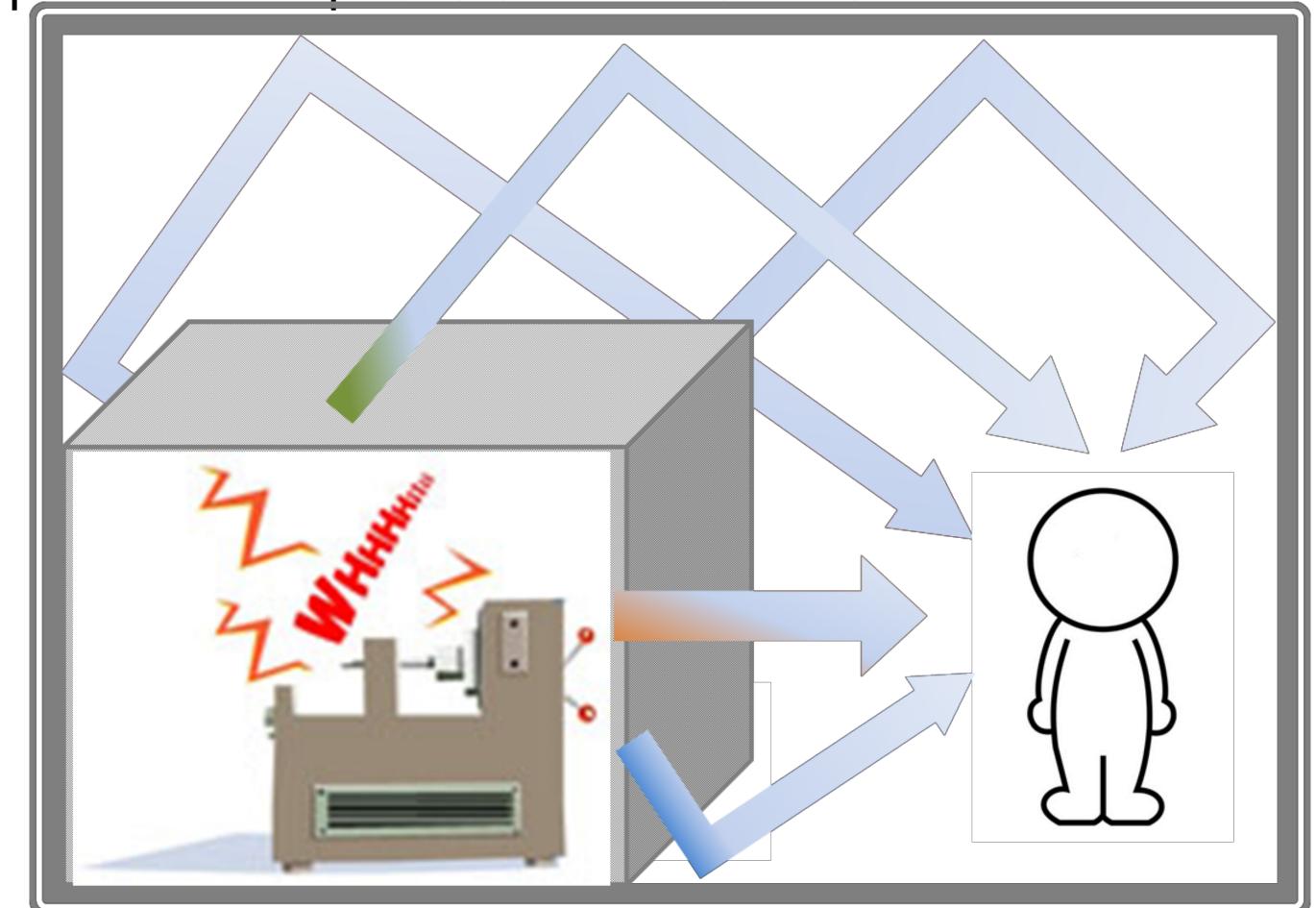
Lorsqu'un milieu de travail est jugé trop bruyant, des actions en matière de réduction du bruit

peuvent être prises selon trois axes



Lorsqu'un milieu de travail est jugé trop bruyant, des actions en matière de réduction du bruit

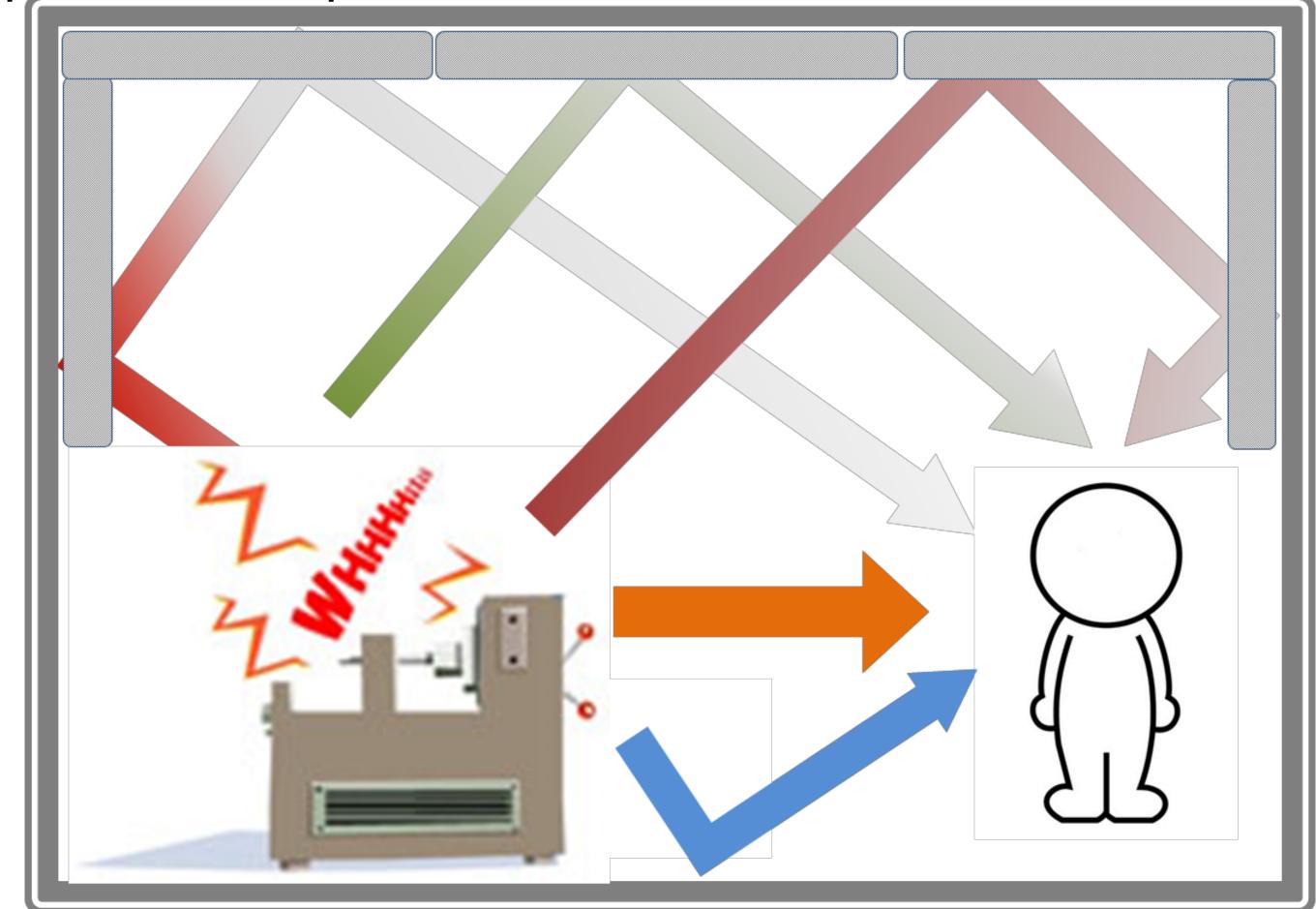
peuvent être prises selon trois axes



1 - La réduction ou l'élimination du bruit directement à la source (machine, moteur ou outil), typiquement par encoffrement

Lorsqu'un milieu de travail est jugé trop bruyant, des actions en matière de réduction du bruit

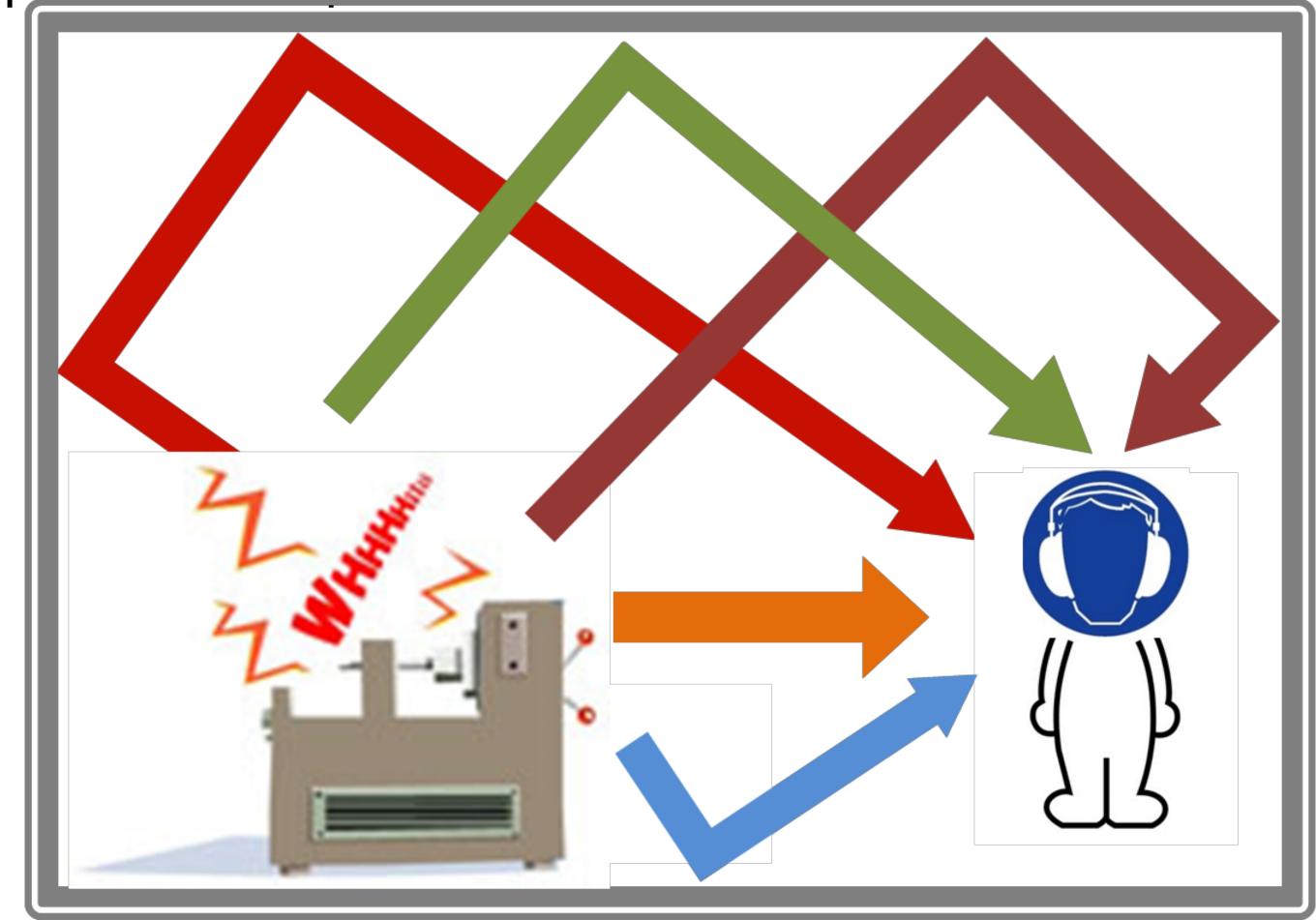
peuvent être prises selon trois axes



2 - La diminution de la transmission du bruit entre la source et le travailleur en installant des matériaux absorbants sur les parois

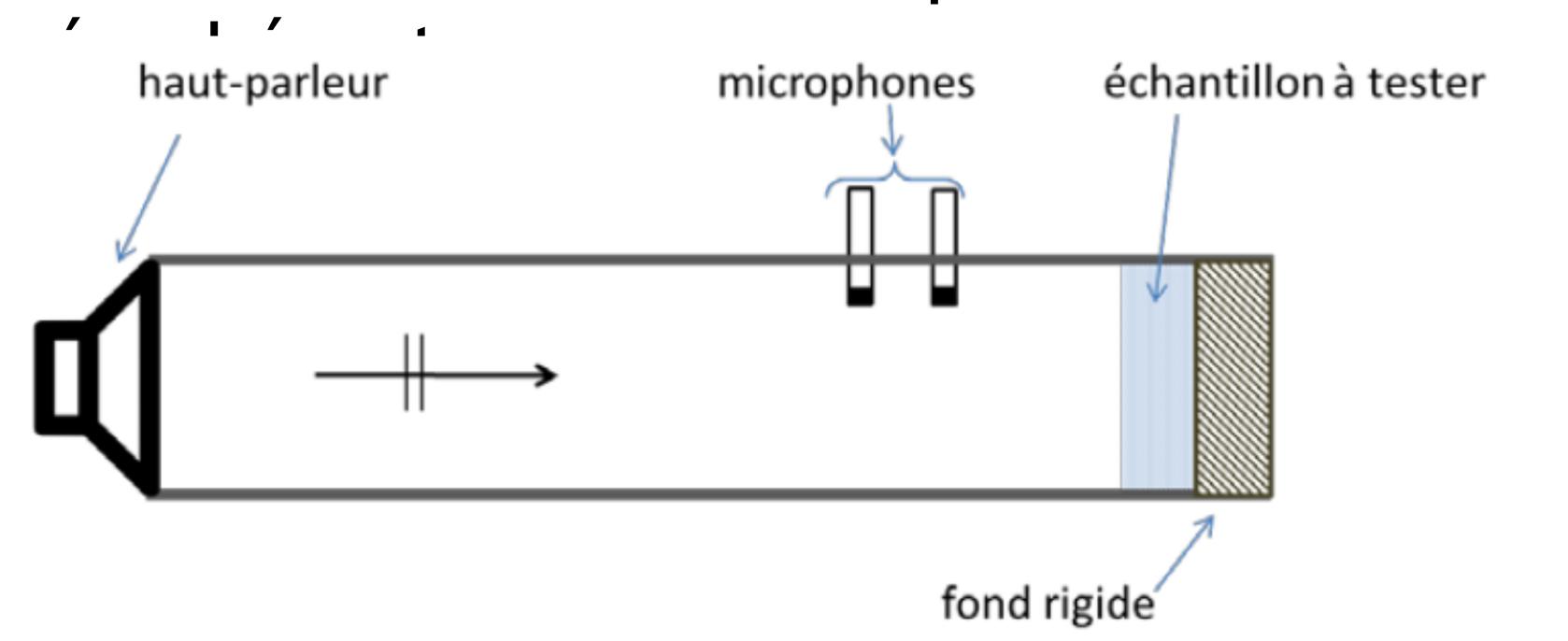
Lorsqu'un milieu de travail est jugé trop bruyant, des actions en matière de réduction du bruit

peuvent être prises selon trois axes



3- Une limitation du temps d'exposition des travailleurs ou l'utilisation de protecteurs auditifs

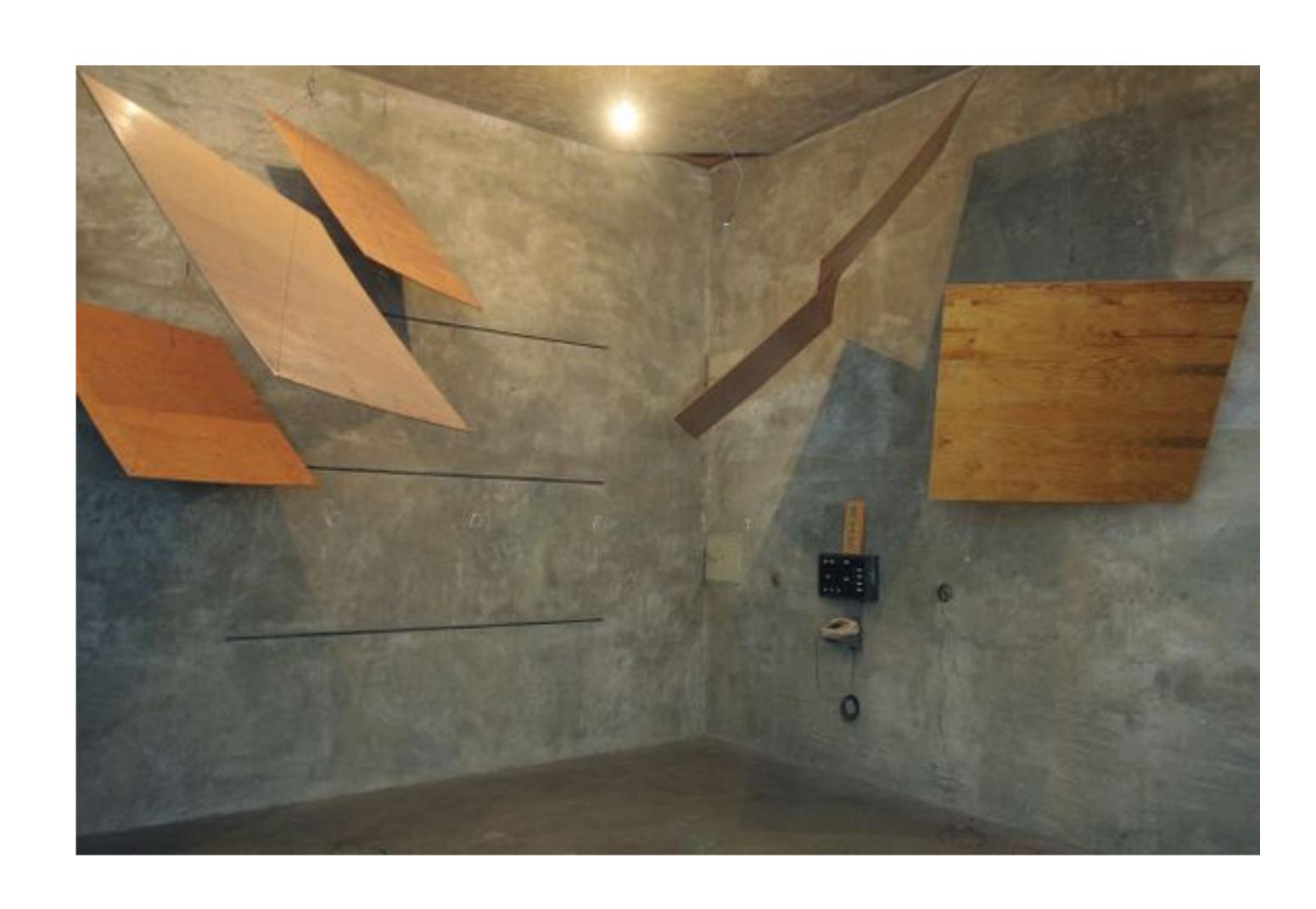
La mise en place de traitements absorbants reste la méthode la plus utilisée en pratique - Ils sont conçus et sélectionnés à partir de la valeur de leur coefficient d'absorption (α, compris entre 0 et 1), mesurable par des méthodes normalisées en <u>tube d'impédance</u> ou en chambre



1- Incidence normale

2- Petits échantillons (diamètre de 10 cm ou moins) qui

En règle générale, la donnée pertinente est le coefficient d'absorption sous champ acoustique diffus (en chambre réverbérante) où le matériau est excité acoustiquement par des ondes acoustiques provenant de toutes les directions de l'espace.



- Des méthodes standardisées existent (ASTM C423, ISO 354)
- On mesure les temps de réverbération dans la chambre de volume V avec et sans échantillon de surface S (T_{sample} et T_0), et le calcul de T_0 of the calcul de T_0 of the calcul de T_0 of the calcul de T_0

et le calcul de
$$\alpha = \frac{55.3 \, V}{c_0 S} \big[\frac{1}{T_{sample}} - \frac{1}{T_0} \big]$$

Mais plusieurs problèmes apparaissent...

ASTMC423: V=125 m³ minimum - S=6.7 m²

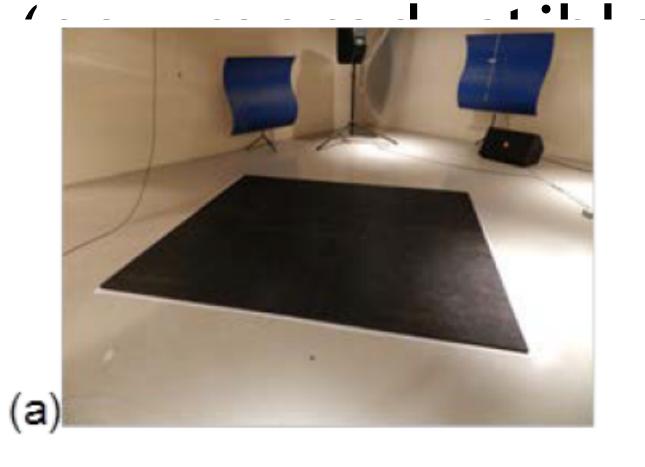
ISO 354: V=150 m³ minimum - S=12 m²

- Évidemment, impossible d'appliquer cette méthode sur site

Introduction

Remplacer le trait d'union par un tiret

De plus: Le résultat d'échantillon et de sa



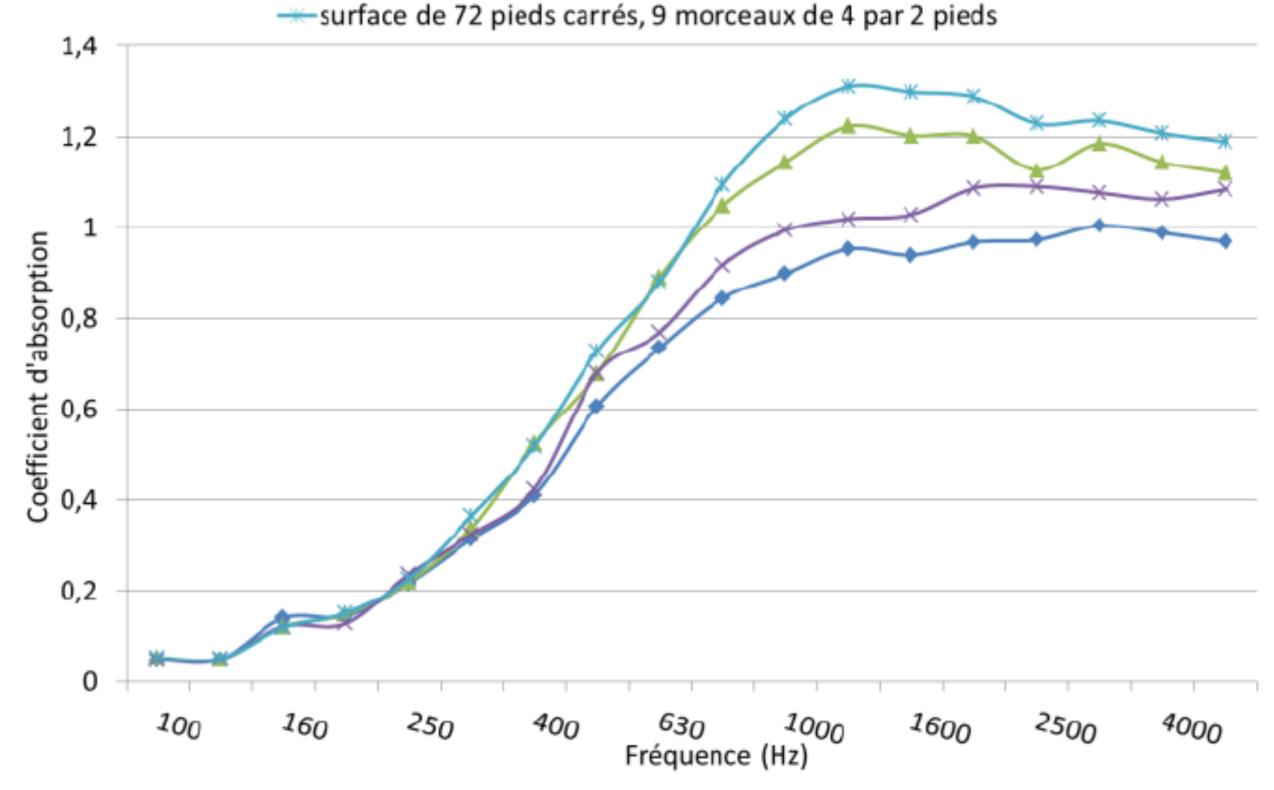






t de la taille de du laboratoire utilisé

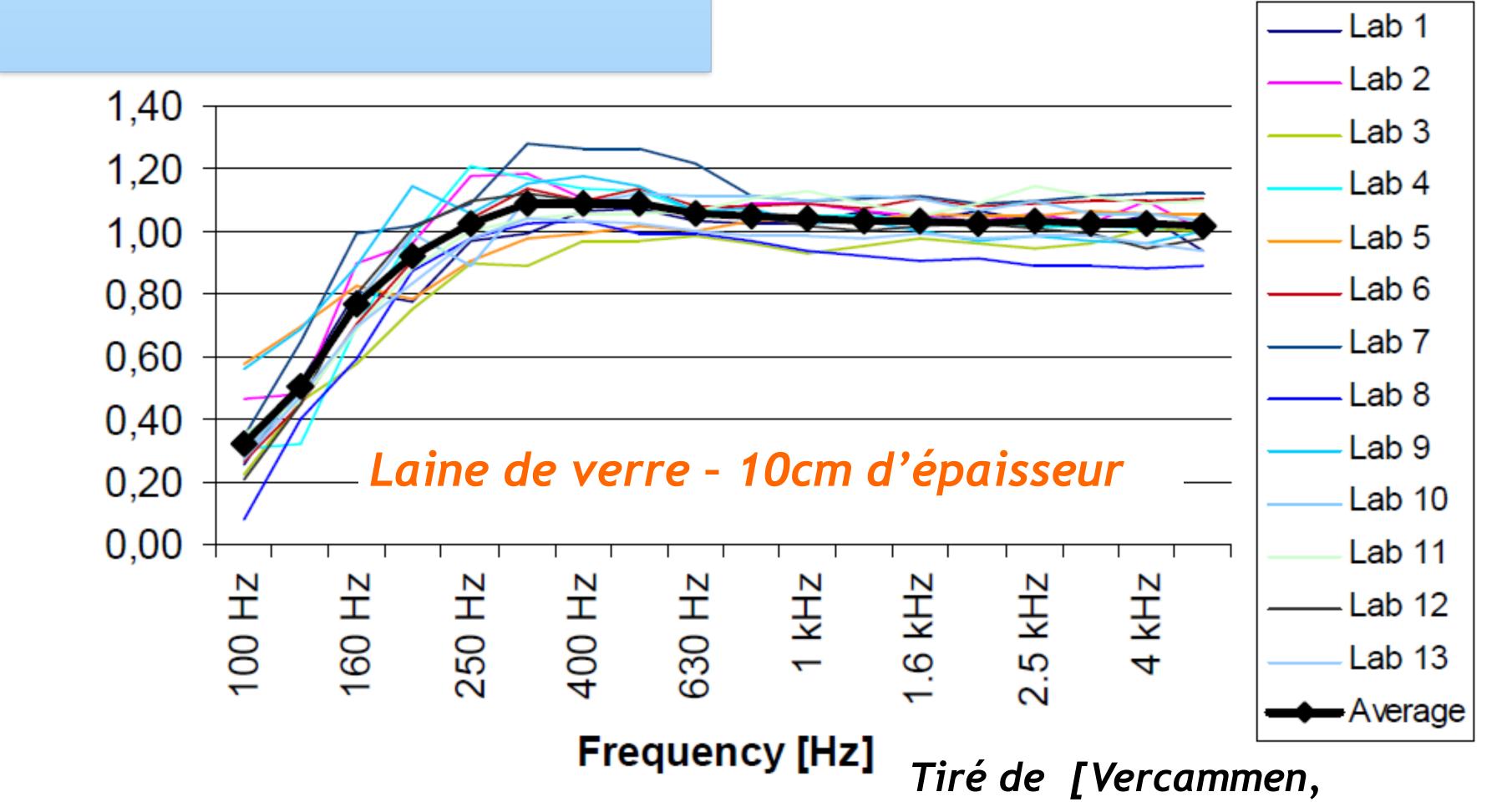
ce de 72 pieds carrés, 8 par 9 pieds (suivant norme)
ce de 72 pieds carrés, trois bandes de 12 par 2 pieds
surrace de 72 pieds carrés, trois bandes de 6 par 4 pieds



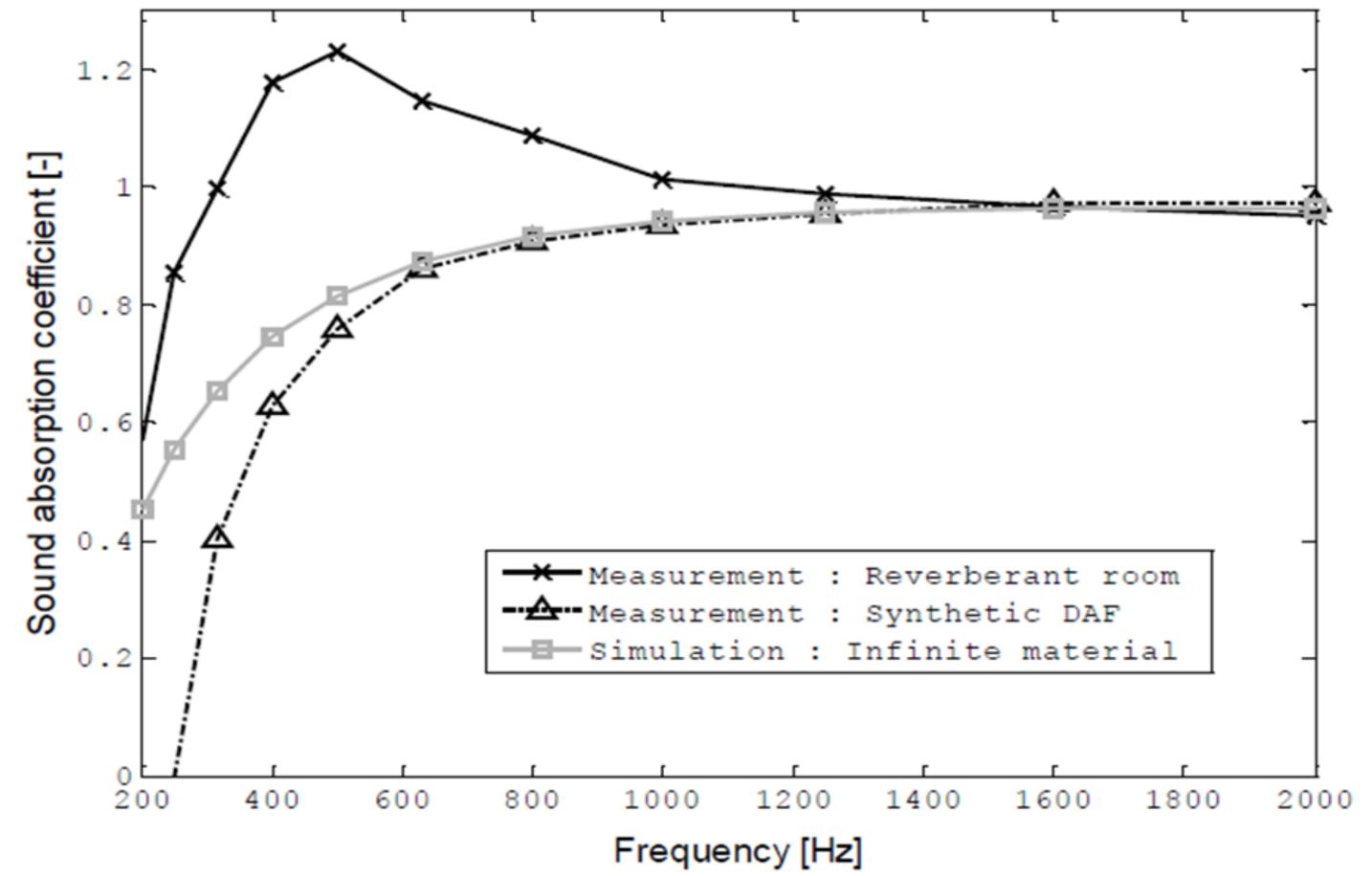
De plus: Le résultat l'échantillon et de sa (peu reproductible)

- 13 laboratoires = 13 réponses différentes

- Les valeurs supérieures à 1 ne sont pas physiques (ni utilisables) nt de la taille de e du laboratoire utilisé



Une méthode a été proposée pour mesurer le coefficient d'absorption sous un champ acoustique diffus synthétisé



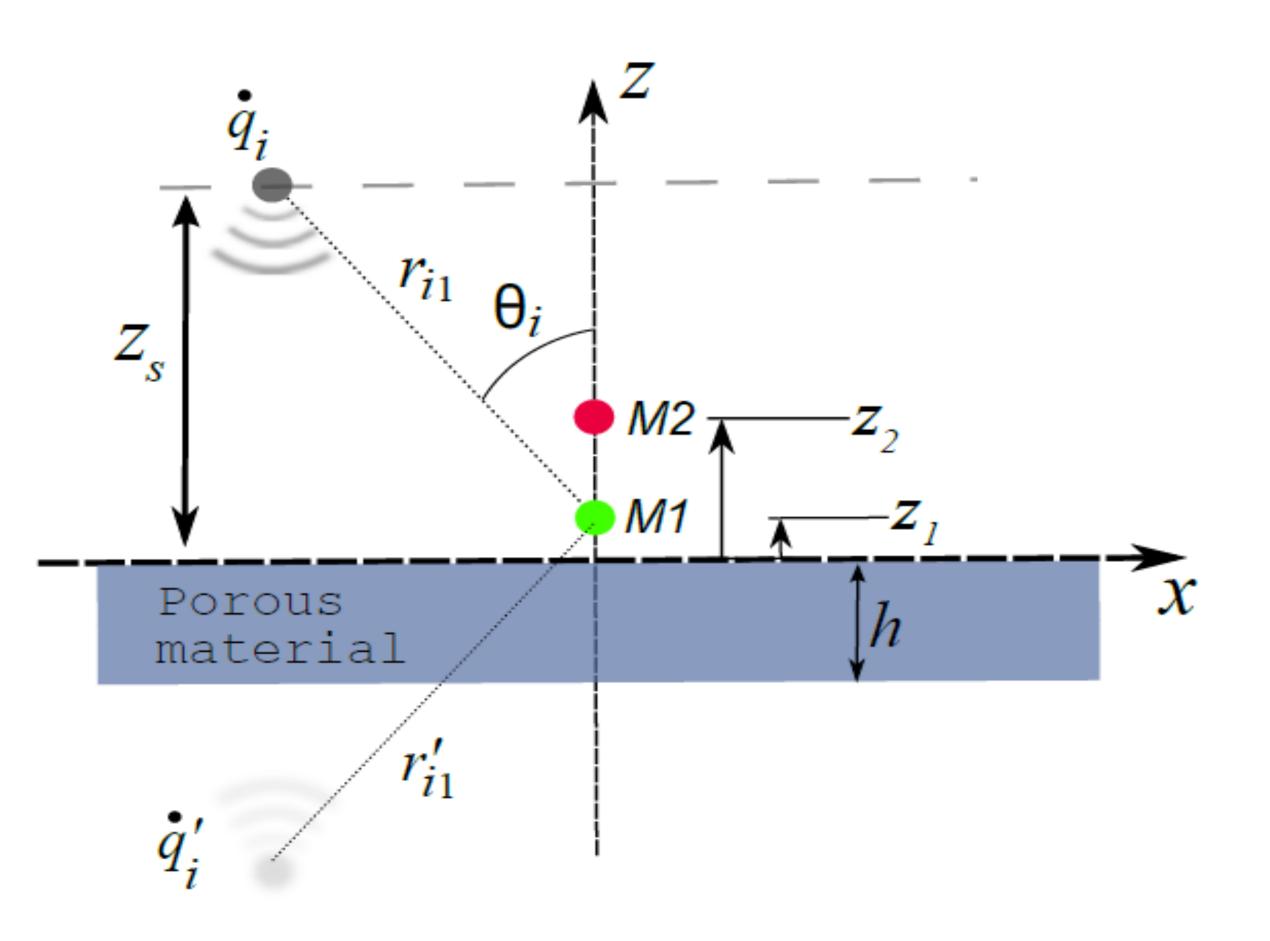
Avantages principaux:

- Pas besoin de préparer les échantillons, qui peuvent être de dimension réduite
- L'estimation de α se fait à une étape de post-traitement, plus flexible

Limitation principale : en basses fréquences

Principe: coefficient d'absorption sous une source ponctuelle

Avec une paire de microphones (M1 et M2) et une source ponctuelle de débit q_i



- Au microphone *j* pour une position i de la aource

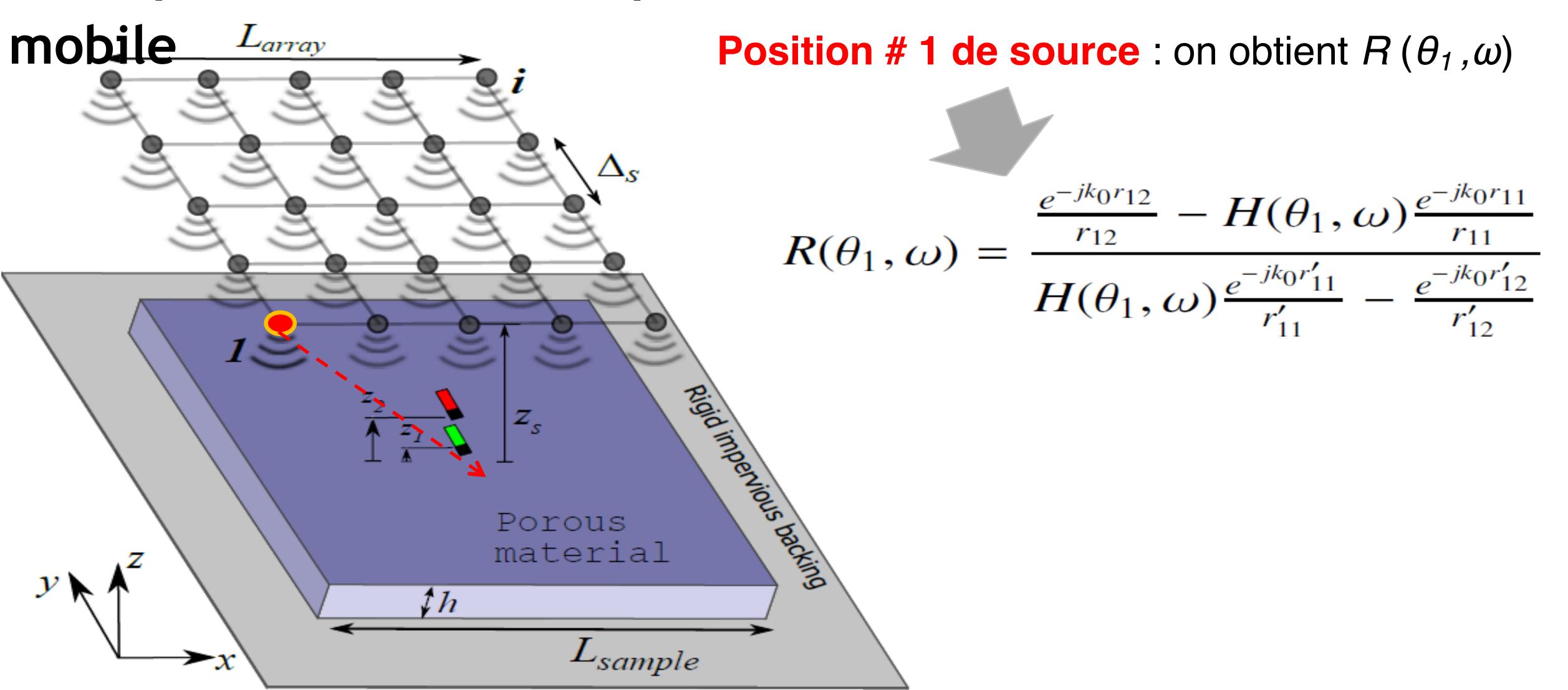
$$ilde{p}_{ij}(heta)$$
 source $ilde{i}k_0r'_{ij}$ - En mo

transfert entre chaque microphone on obtier $e^{-jk_0r_{i2}}$

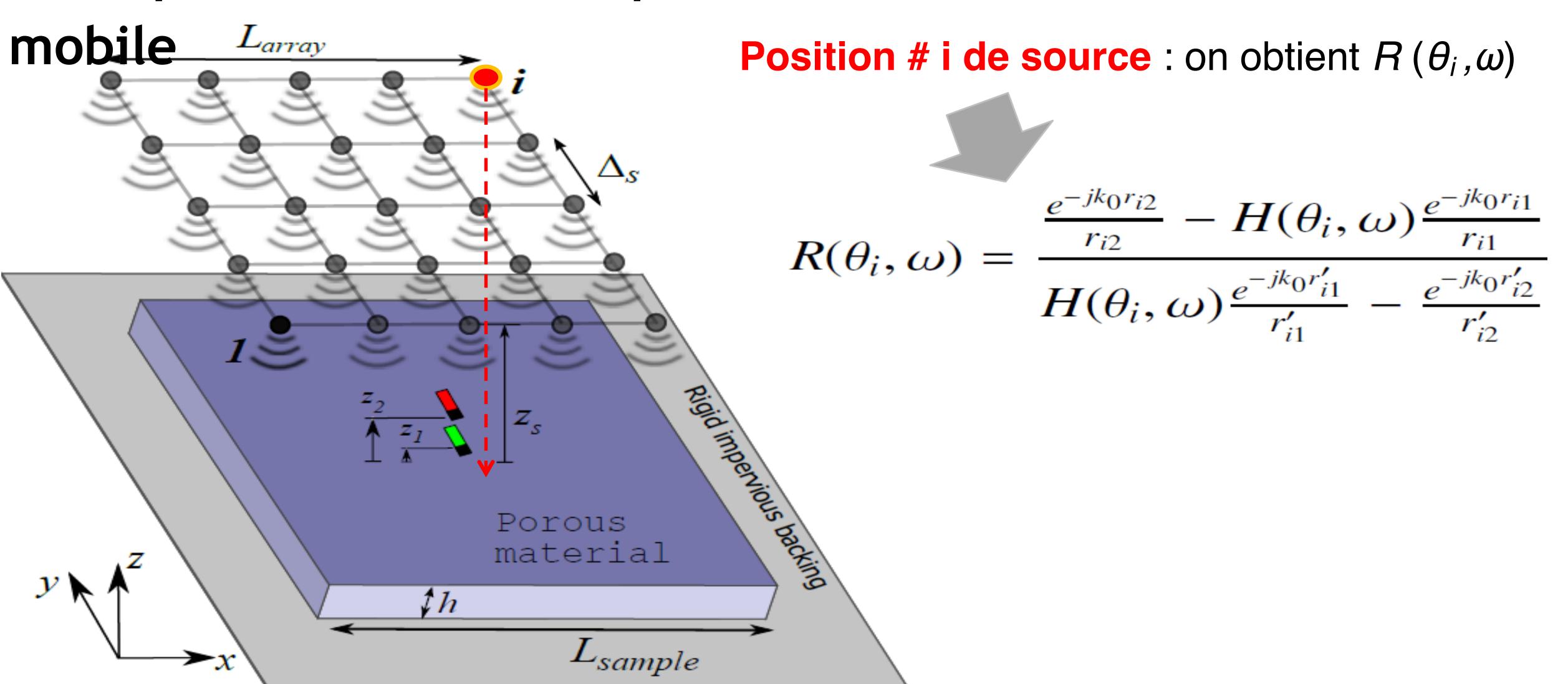
$$R(\theta_{i}, \omega) = \frac{\frac{e^{-jk_{0}r_{i2}}}{r_{i2}} - H(\theta_{i}, \omega) \frac{e^{-jk_{0}r_{i1}}}{r_{i1}}}{H(\theta_{i}, \omega) \frac{e^{-jk_{0}r_{i1}}}{r'_{i1}} - \frac{e^{-jk_{0}r'_{i2}}}{r'_{i2}}}$$

Le coefficient d'absorption $\alpha(\theta_i, \omega) = 1 - |R(\theta_i, \omega)|^2$

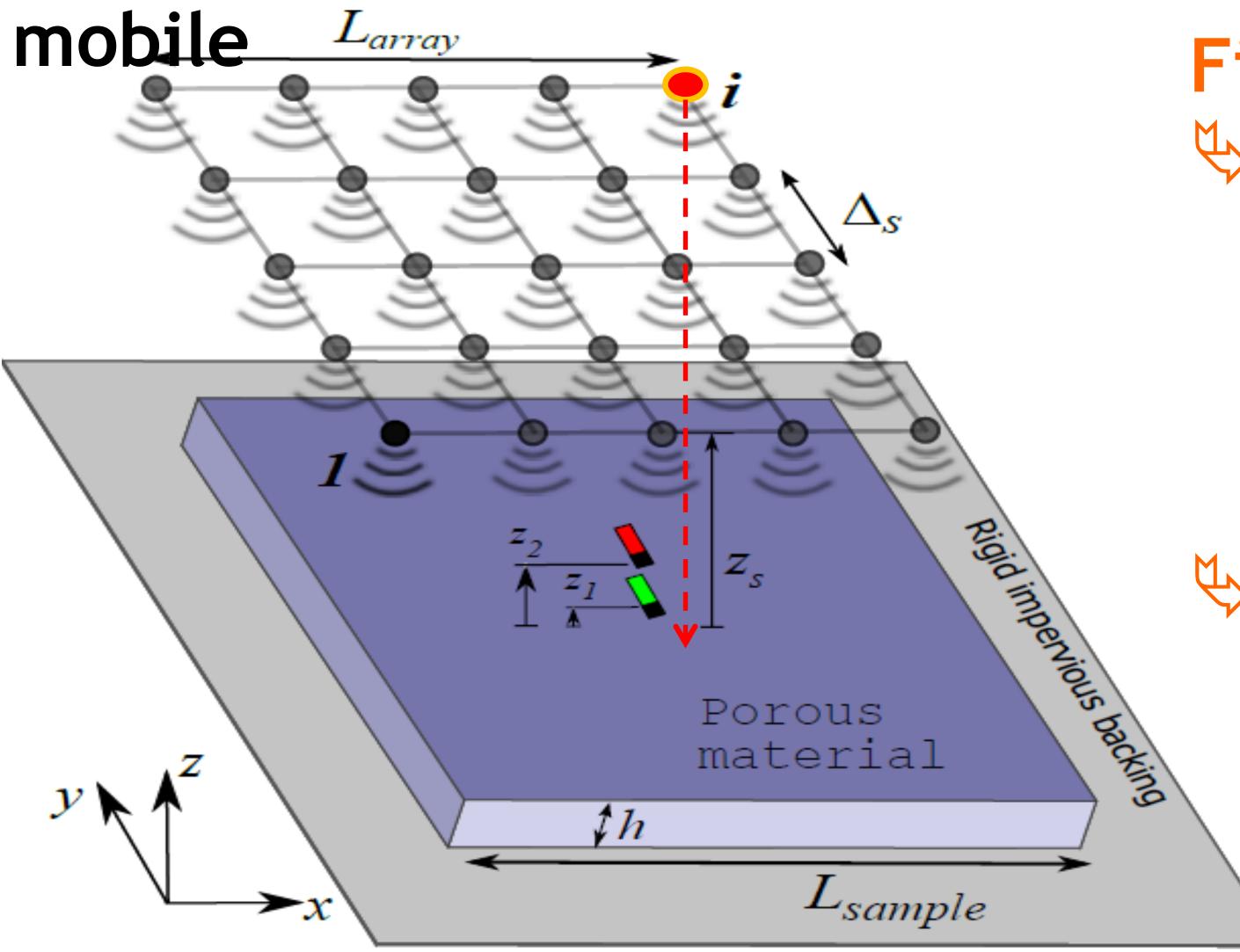
Principe: les deux microphones sont fixes et la source



Principe: les deux microphones sont fixes et la source



Principe: les deux microphones sont fixes et la source

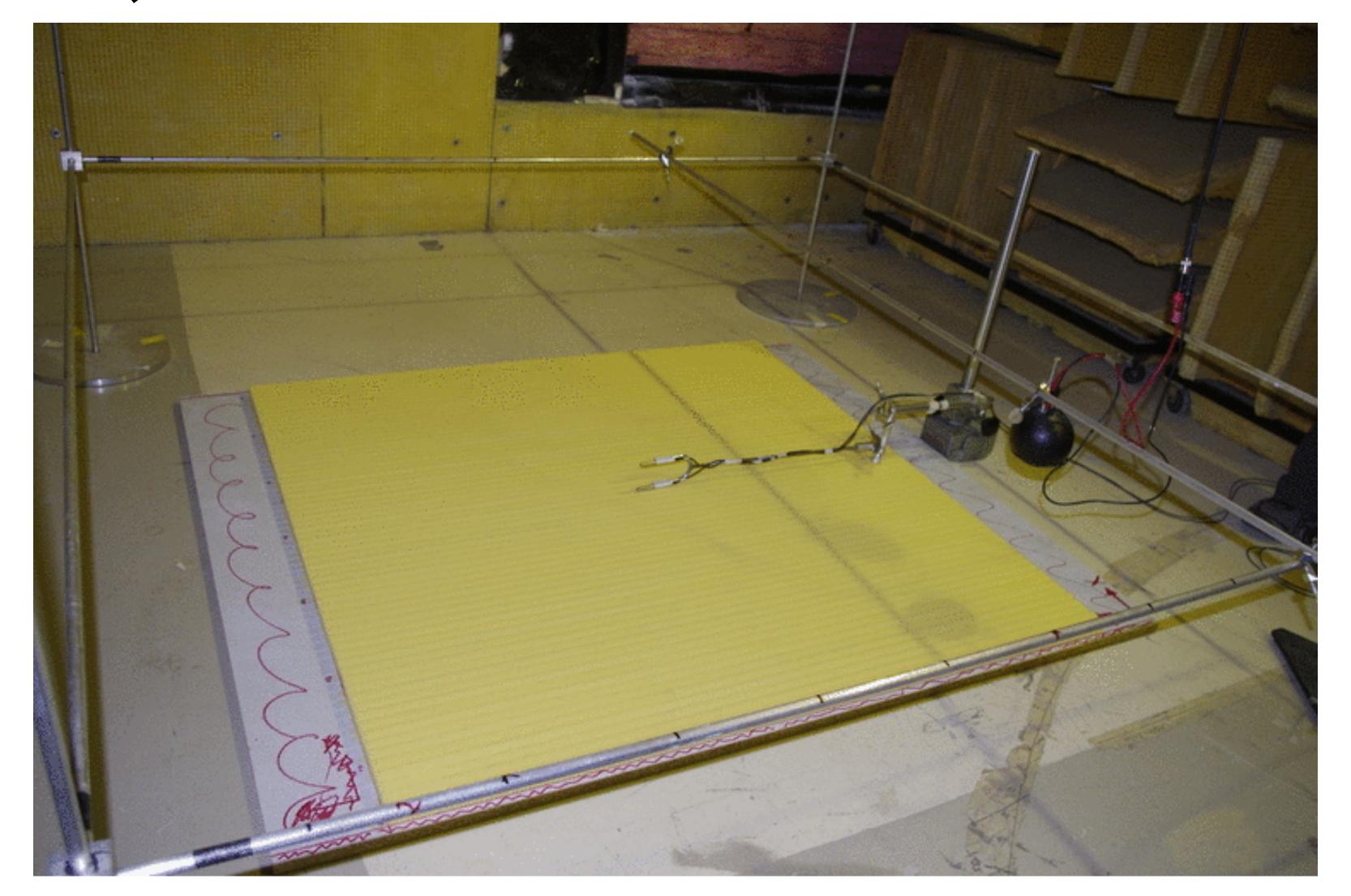


Finalement

Une base de données de coefficients de réflexion à différents angles d'incidence est obtenue

Un réseau virtuel de sources ponctuelles est créé face au matériau à tester

Concrètement, la source scanne la surface du matériau



Coefficient de réflexion et d'absorption sous un réseau virtuel

Si l'on couple une matrice d'amplitude de sources $\mathbf{S}_{\mathbf{OO}}$ à la base de données de coefficient de réflexion, il est possible d'estimer finalement le coefficient d'absorption sous un champ acoustique diffus synthétique

Mesure de $R(\theta_i, \omega)$

Calcul de S_{QQ} (cible : reproduire un champ diffus sur la surface du matériau)

On obtient le coefficient de réflexion élevé au carré

$$|R_{synth}(\omega)|^2 = \frac{\mathbf{h_1}^H \mathbf{S_{\dot{\mathbf{Q}}\dot{\mathbf{Q}}} \mathbf{h_1}}{\mathbf{g_1'}^H \mathbf{S_{\dot{\mathbf{O}}\dot{\mathbf{O}}} \mathbf{g_1'}}$$

Et à la fin

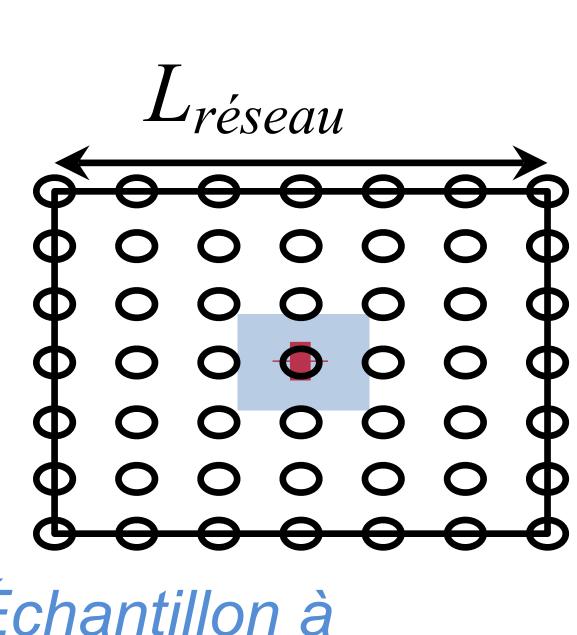
$$\alpha_{synth}(\omega) = 1 - |R_{synth}(\omega)|^2$$

Simulations numériques

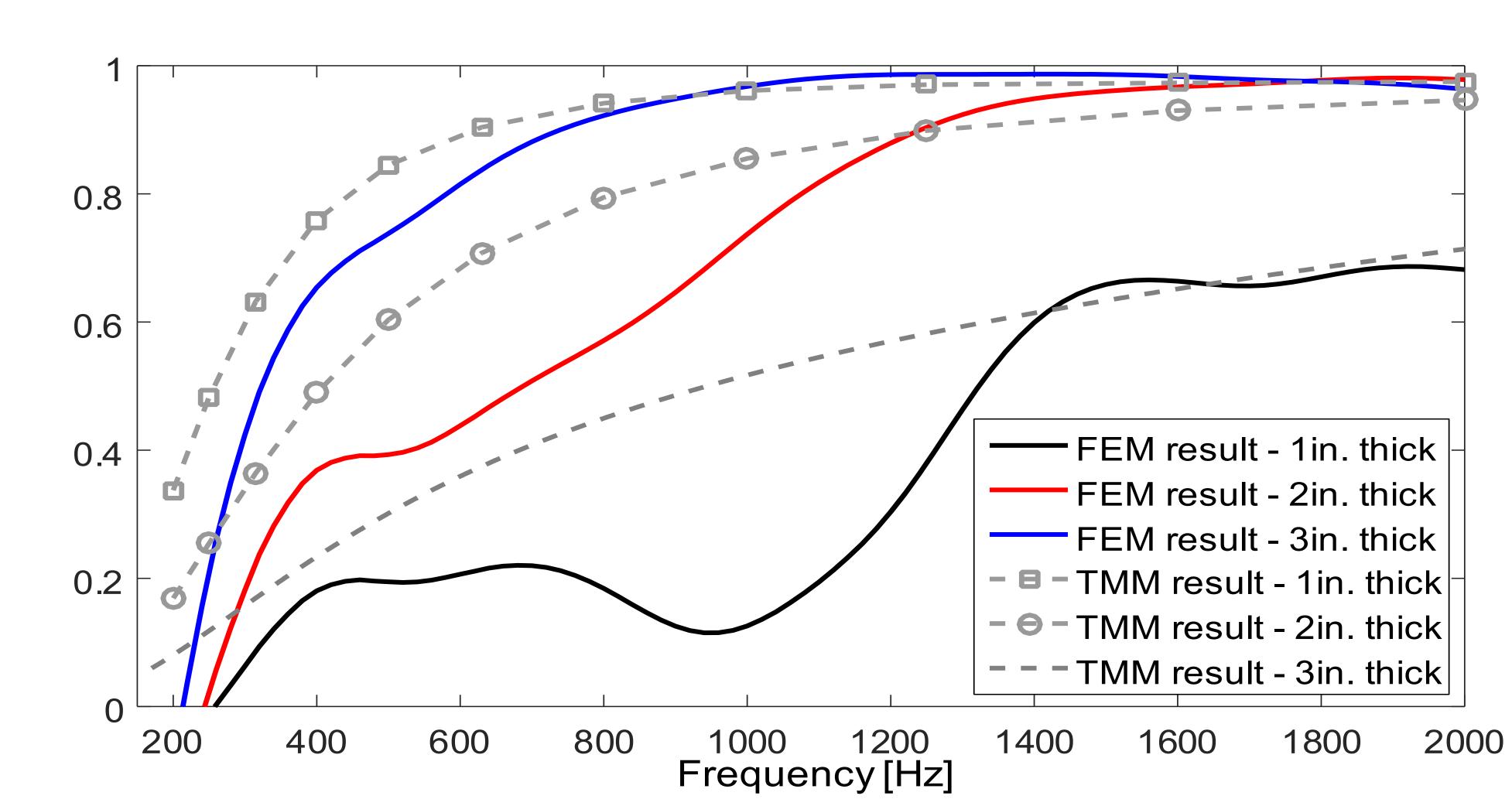
- Objectif des simulations :
 - Étudier de manière numérique l'influence de la taille de l'échantillon, de la taille du réseau et sa hauteur On utilise pour cela des simulations par éléments finis (Finite Element Model, FEM)
 - Obtenir des valeurs de référence pour un matériau de dimensions infinies (cas idéalisé, qui reste la cible) -> calcul TMM (Transfer Matrix Method, ou méthodes des matrices de transfert)

Simulations numériques : taille de l'échantillon

Matériau de côté 0.22 m (quatre fois plus petit que le réseau)

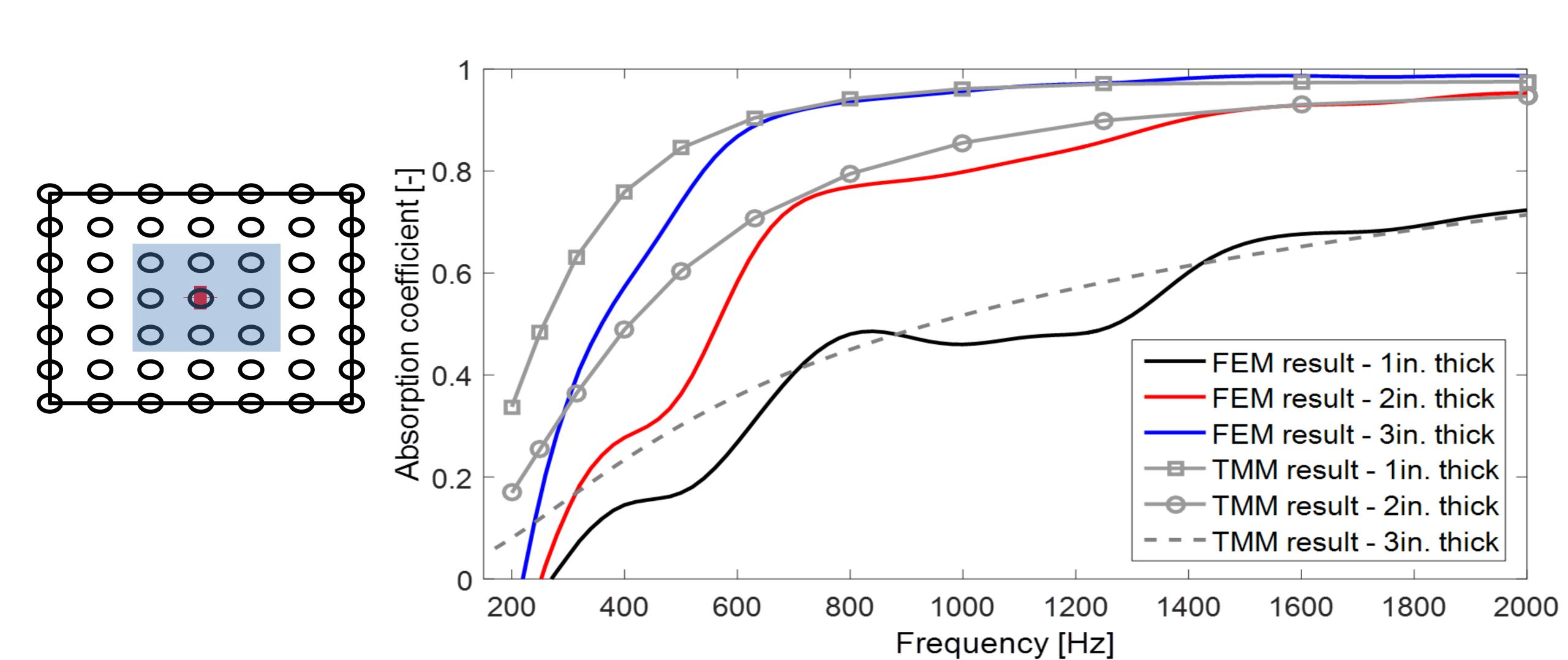


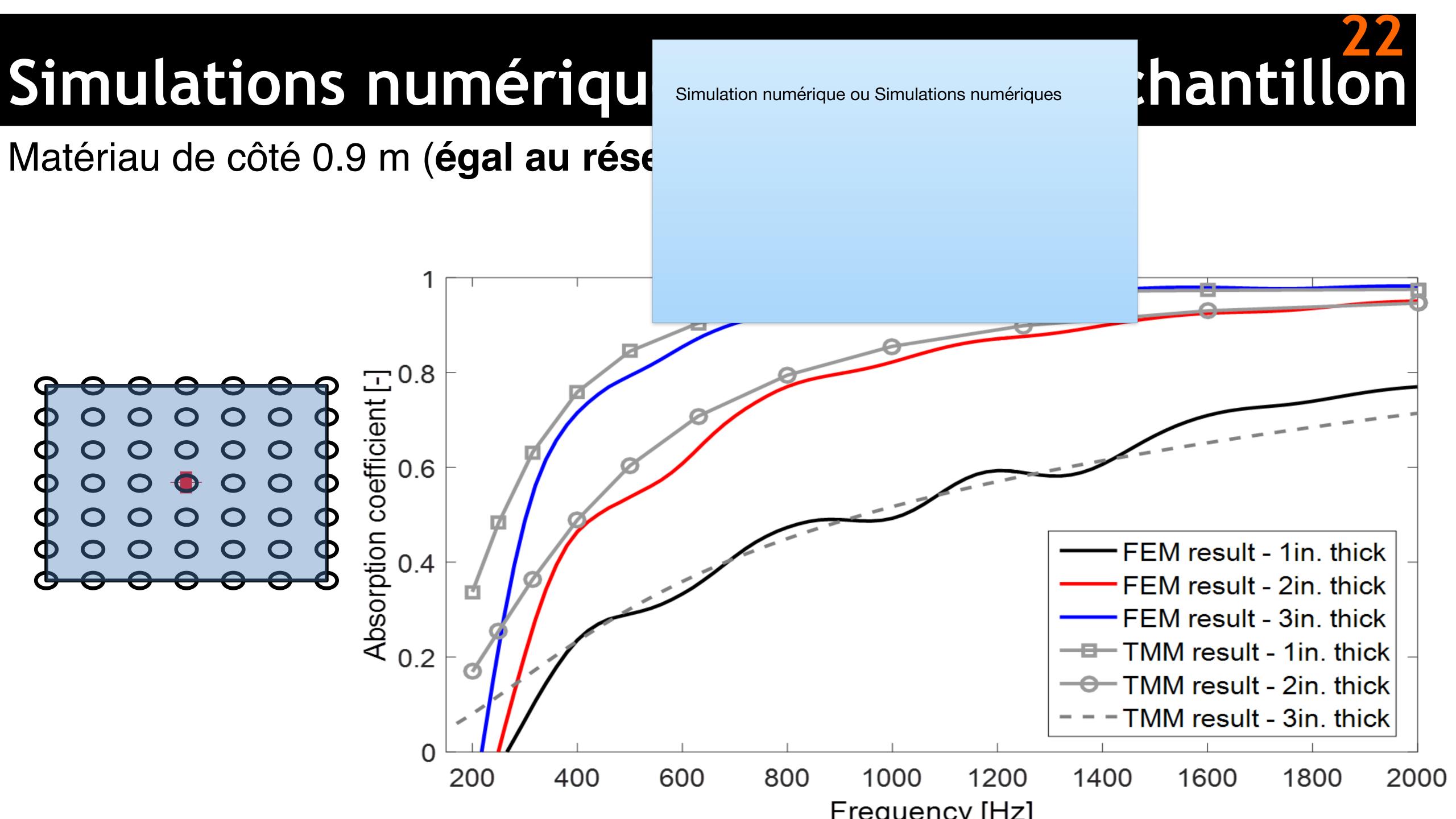
Échantillon à tester



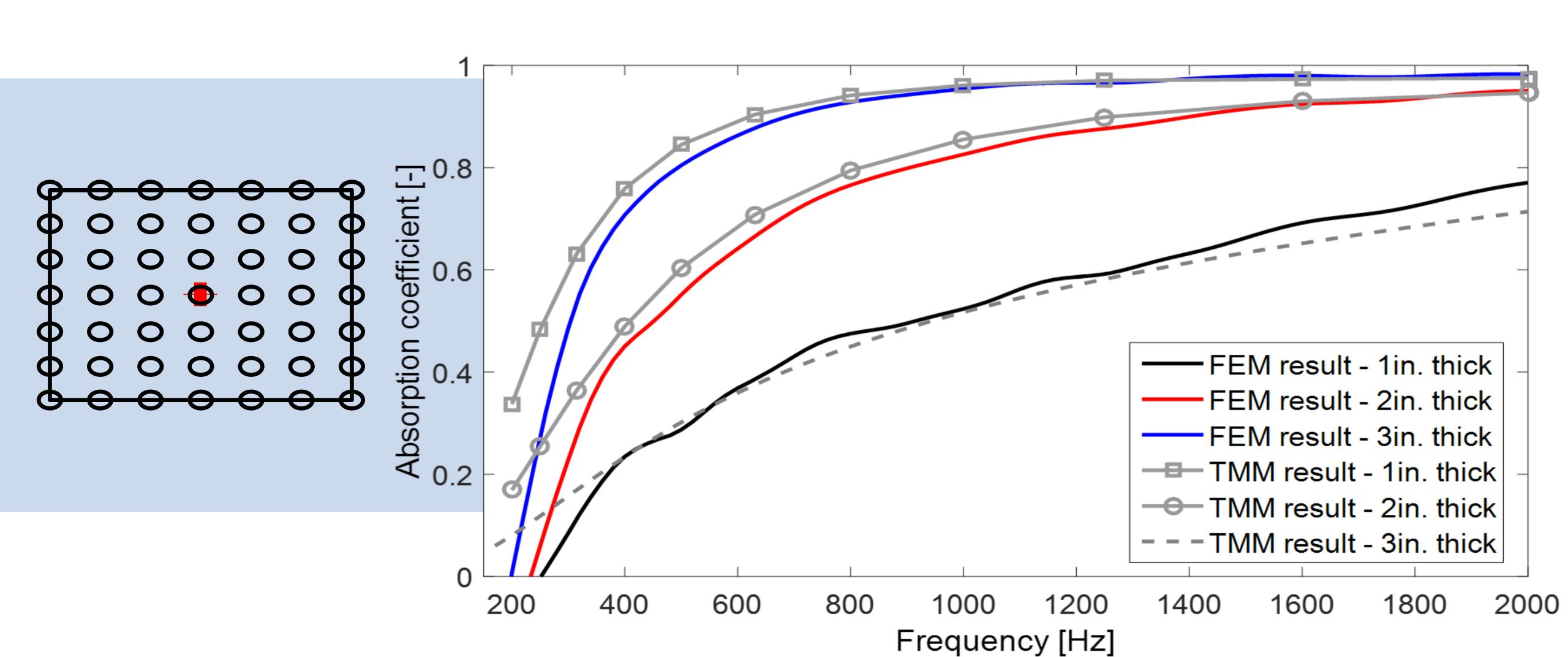
Simulations numériques : taille de l'échantillon

Matériau de côté 0.45 m (deux fois plus petit que le réseau)

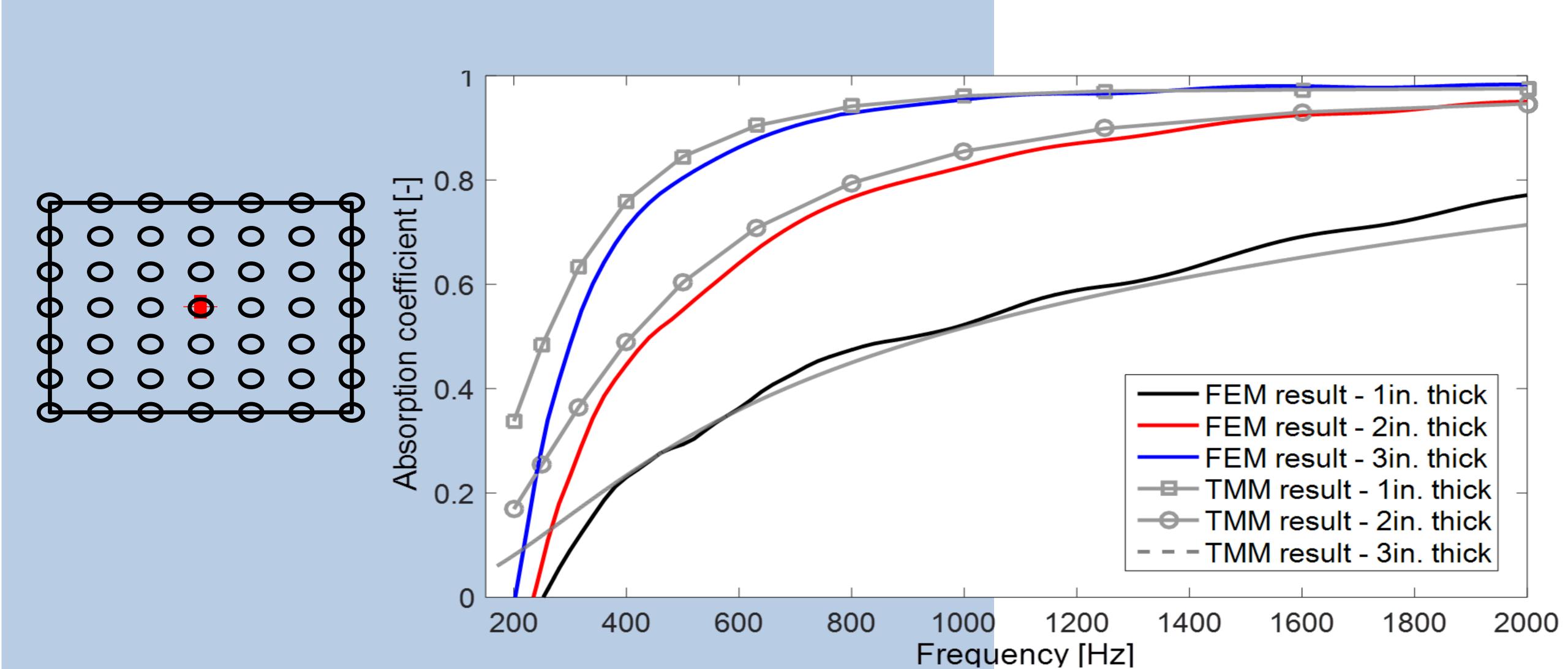




Matériau de côté 1.8 m (deux fois plus grand que le réseau)

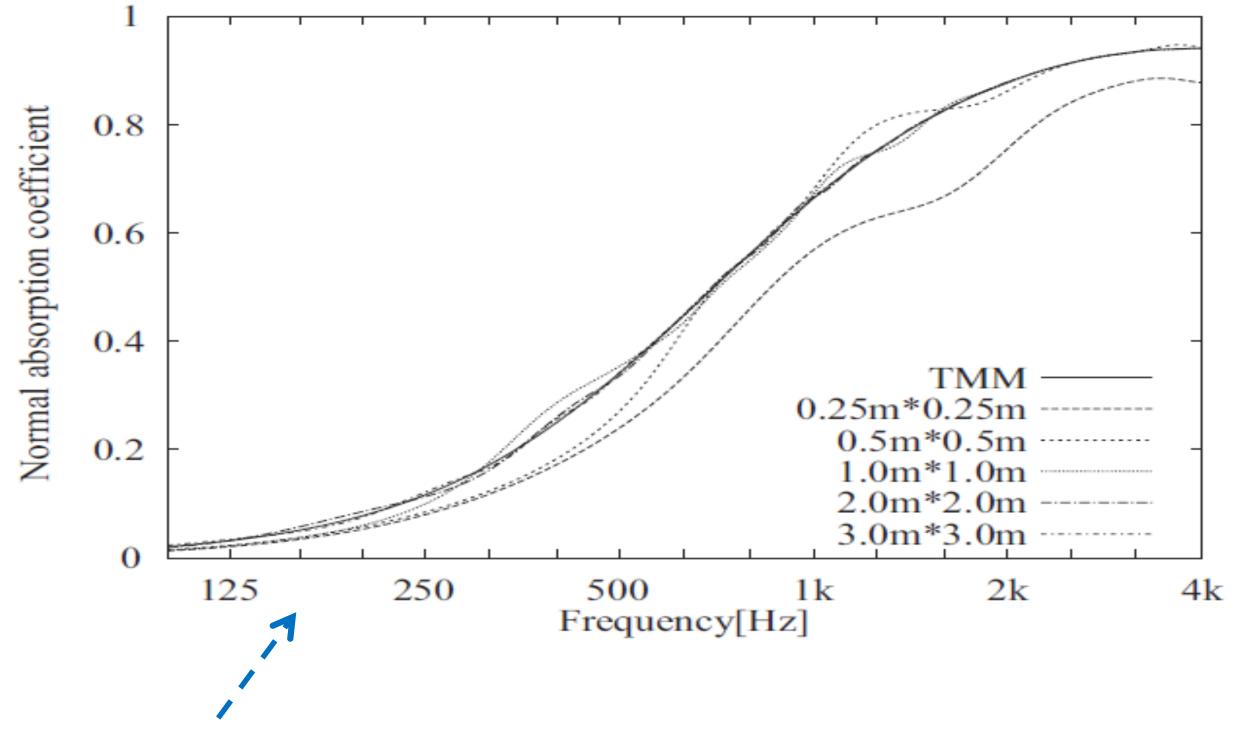


Matériau de côté 3.6 m (quatre fois plus grand que le réseau)



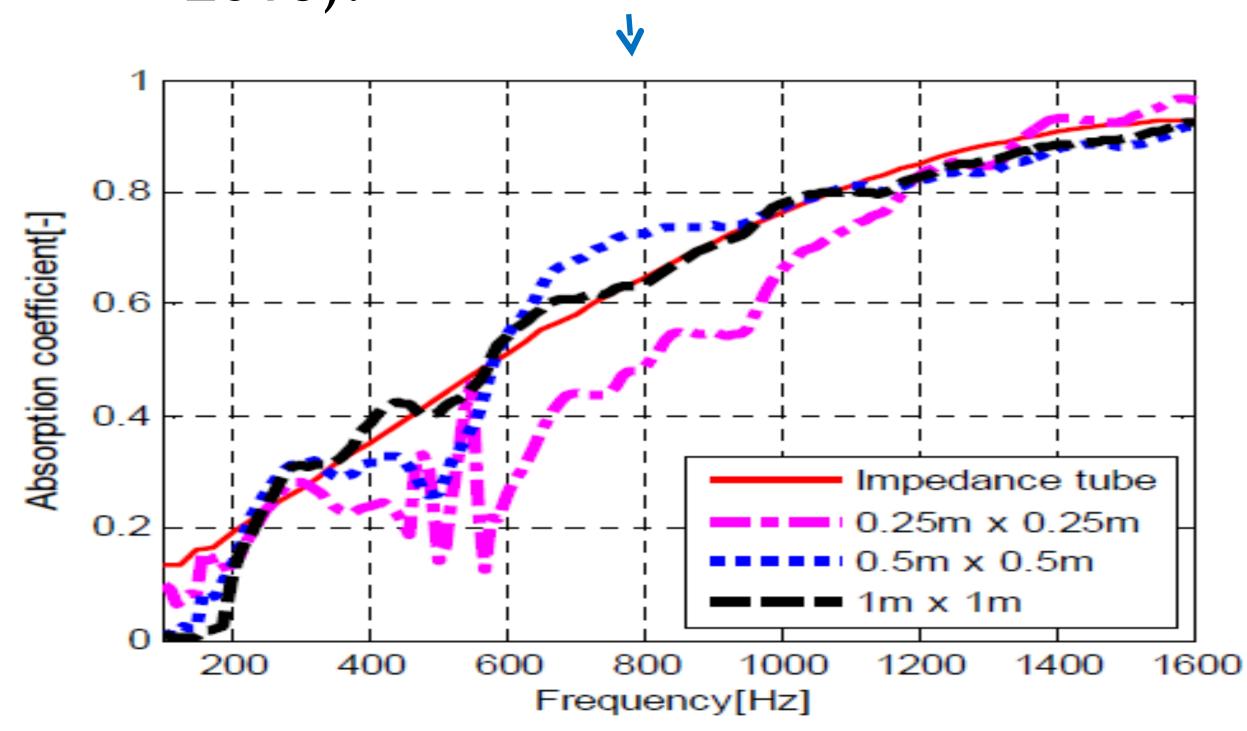
Simulations numériques : taille de l'échantillon

Résultats consistants avec la littérature



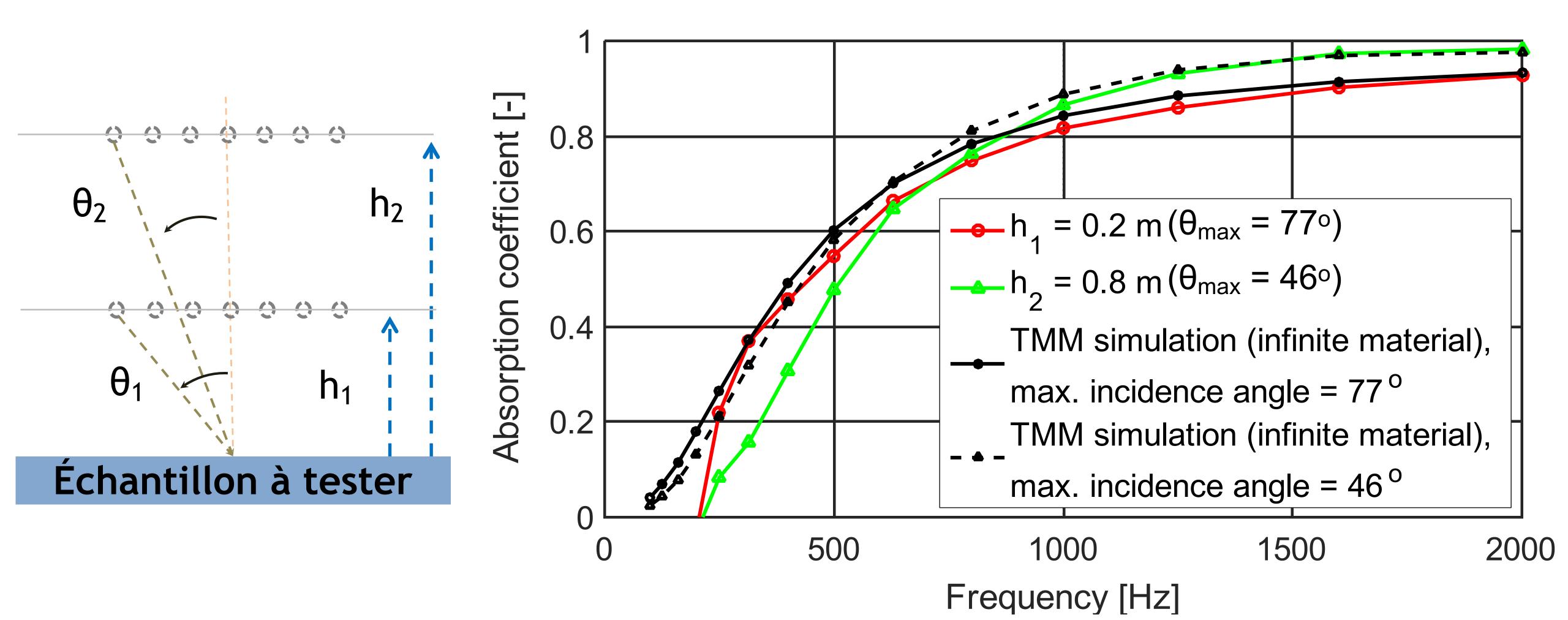
Simulation de l'effet de taille de l'échantillon pour une laine de verre (Hirosawa et al., JASA 2009)

Mesure avec synthèse d'onde plane sur une mousse de mélamine (Yankai et al., ICSV 2016).



Simulations numériques : hauteur du réseau

- Pour un réseau de largeur fixe, sa hauteur est maintenant variée
- Réseau de 9x9 sources, $h_2 > h_1$, $\theta_2 < \theta_1$



Simulations numériques : en résumé

- L'échantillon à tester devrait être au moins aussi grand que l'antenne utilisée. Si ce critère n'est pas respecté, des effets de bord sont visibles et vont biaiser les résultats. Si ce critère est respecté, les effets de taille et de bords sont très faibles.
- Un compromis nécessaire apparaît concernant le rapport «
 hauteur sur largeur » du réseau de sources. Élargir le réseau
 permet théoriquement de reproduire des angles d'incidence plus
 élevés, mais cela n'améliore que peu les résultats obtenus.
 Augmenter la hauteur des sources pour améliorer la problématique
 vue en basses fréquences a finalement un effet adverse en
 réduisant l'angle d'incidence maximal.

Les matériaux testés



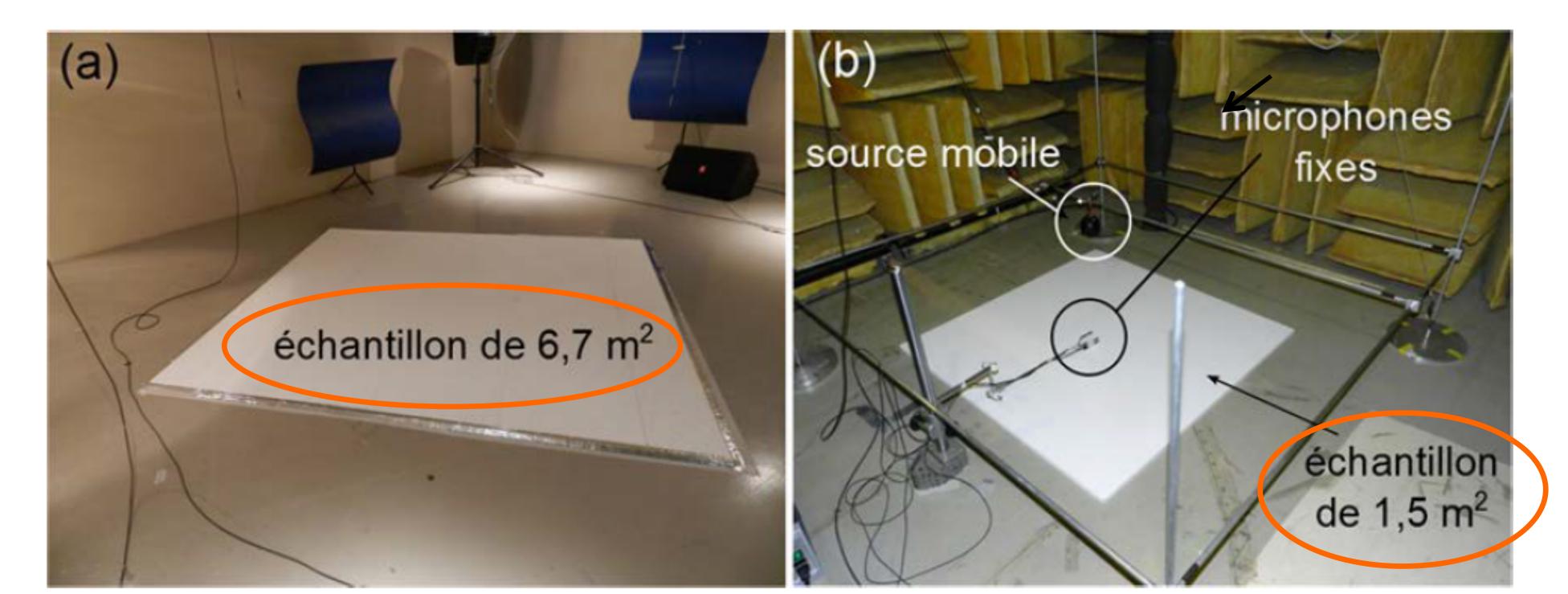
Les matériaux testés

Les paramètres des matériaux ont été caractérisés en laboratoire

Material	Tortuosity	Porosity	Resistivity	Viscous length	Thermal length	Foam mass
	$lpha_{\infty}$	ϕ	σ	Λ	Λ'	density ρ_1
	[-]	[-]	$[Nm^{-4}s]$	$[\mu \mathrm{m}]$	$[\mu \mathrm{m}]$	$[kg.m^{-3}]$
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

Et les mesures reausees en champre reverberante et seion la methode

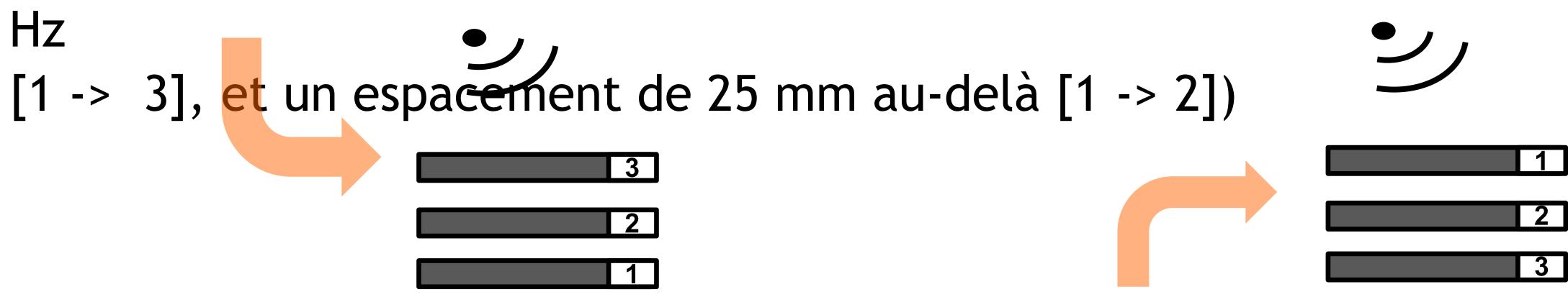
proposée



Les matériaux testés

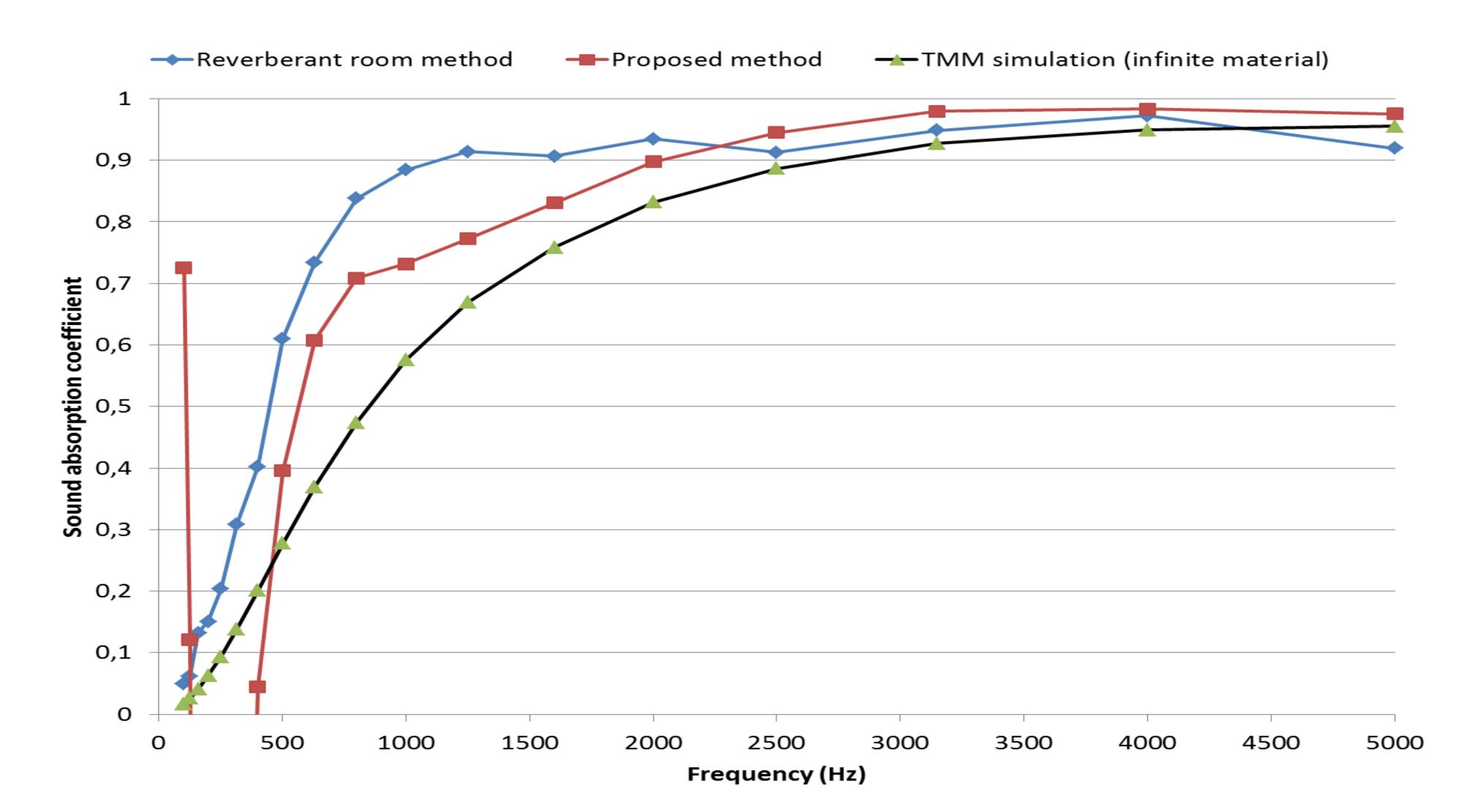
Arrangement final utilisé pour les tests

- Un réseau placé à une hauteur de 20 cm, de 7 x 7 sources espacées de 15 cm
- Un triplet de microphones (au lieu d'un doublet), de sorte à couvrir toute la gamme fréquentielle d'intérêt (un espacement de 50 mm jusqu'à 3150

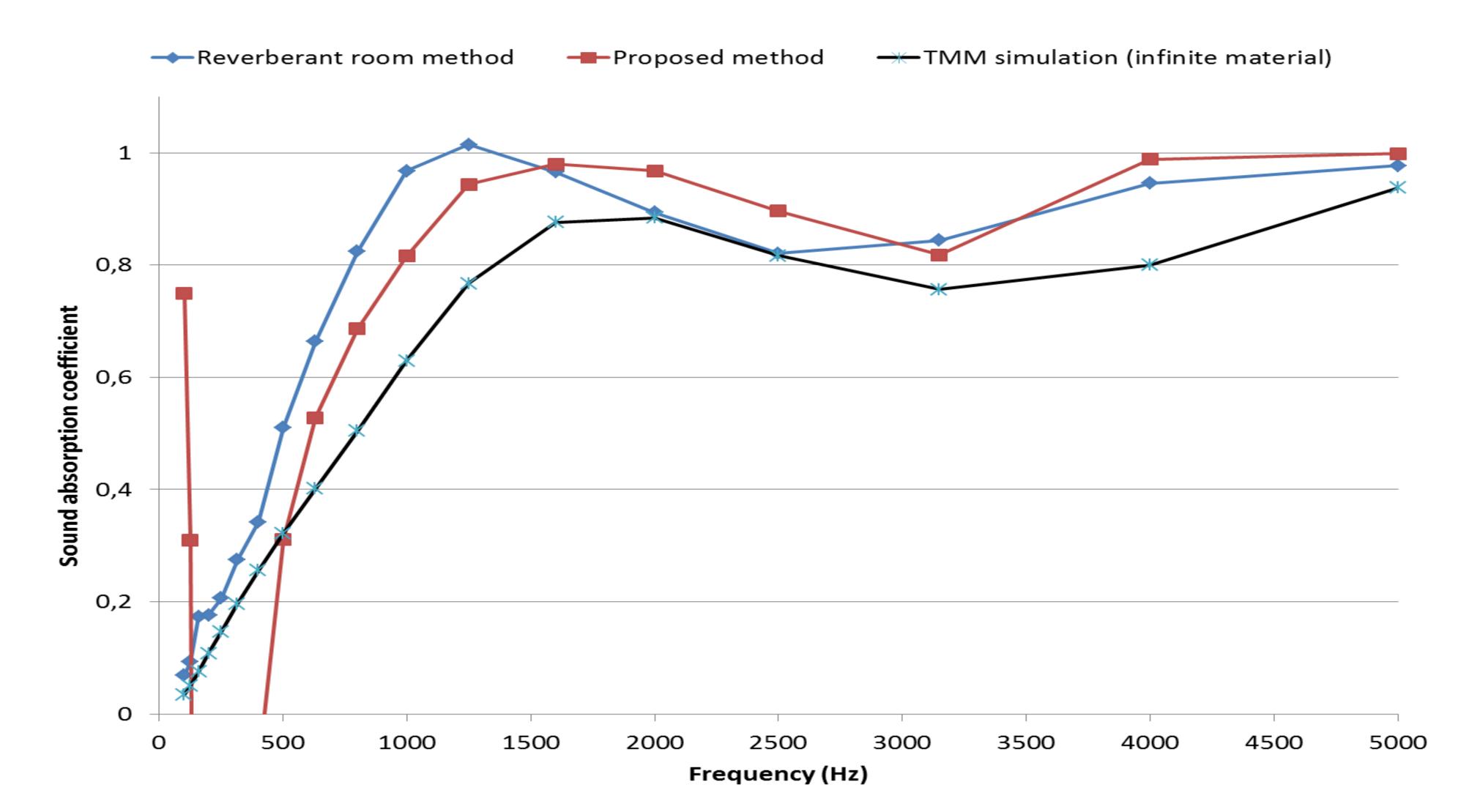


 Les positions des microphones sont permutées pour améliorer la précision en basse fréquence - un signal de type sinus glissant est utilisé pour

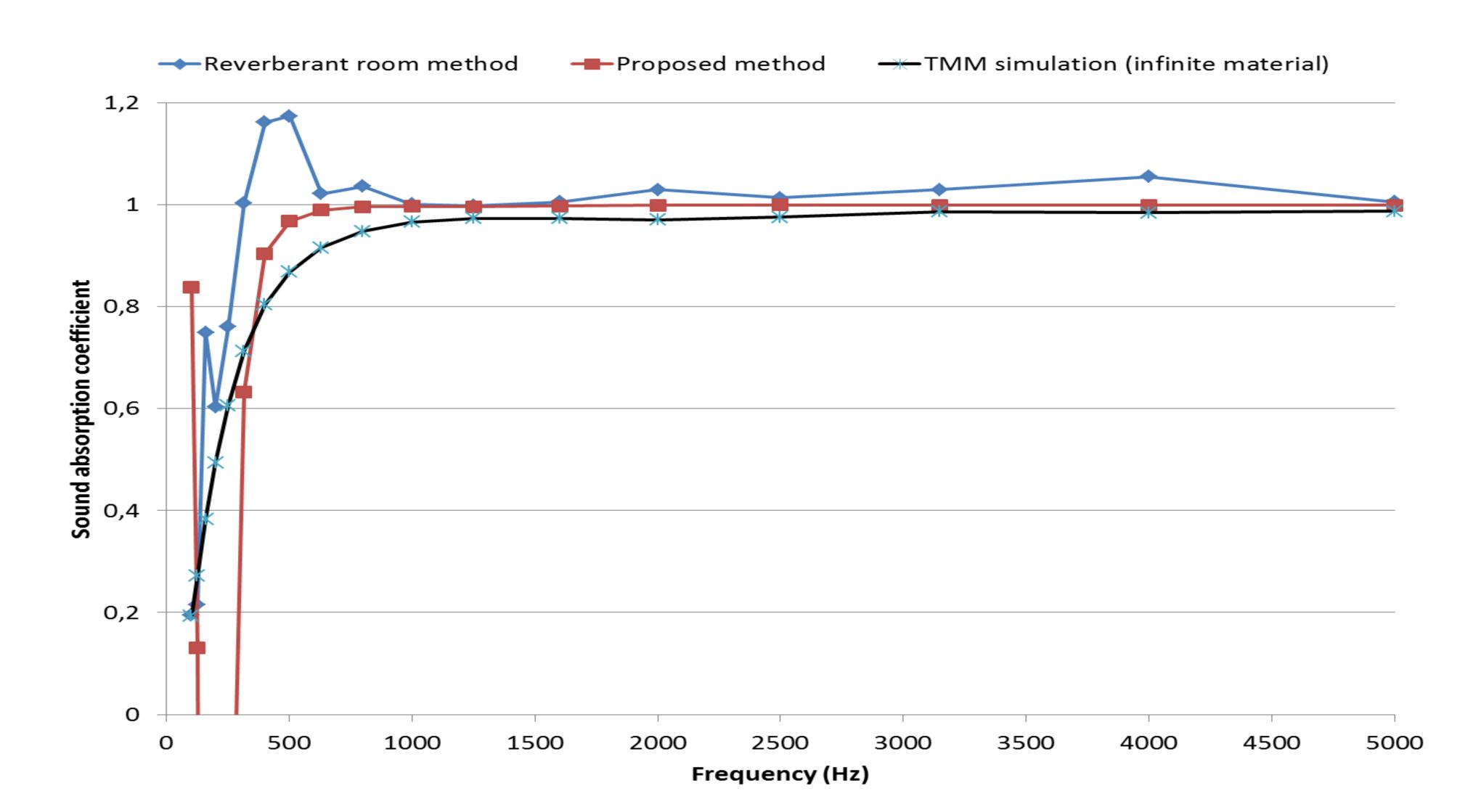
Cas du panneau de fibre de verre comprimée



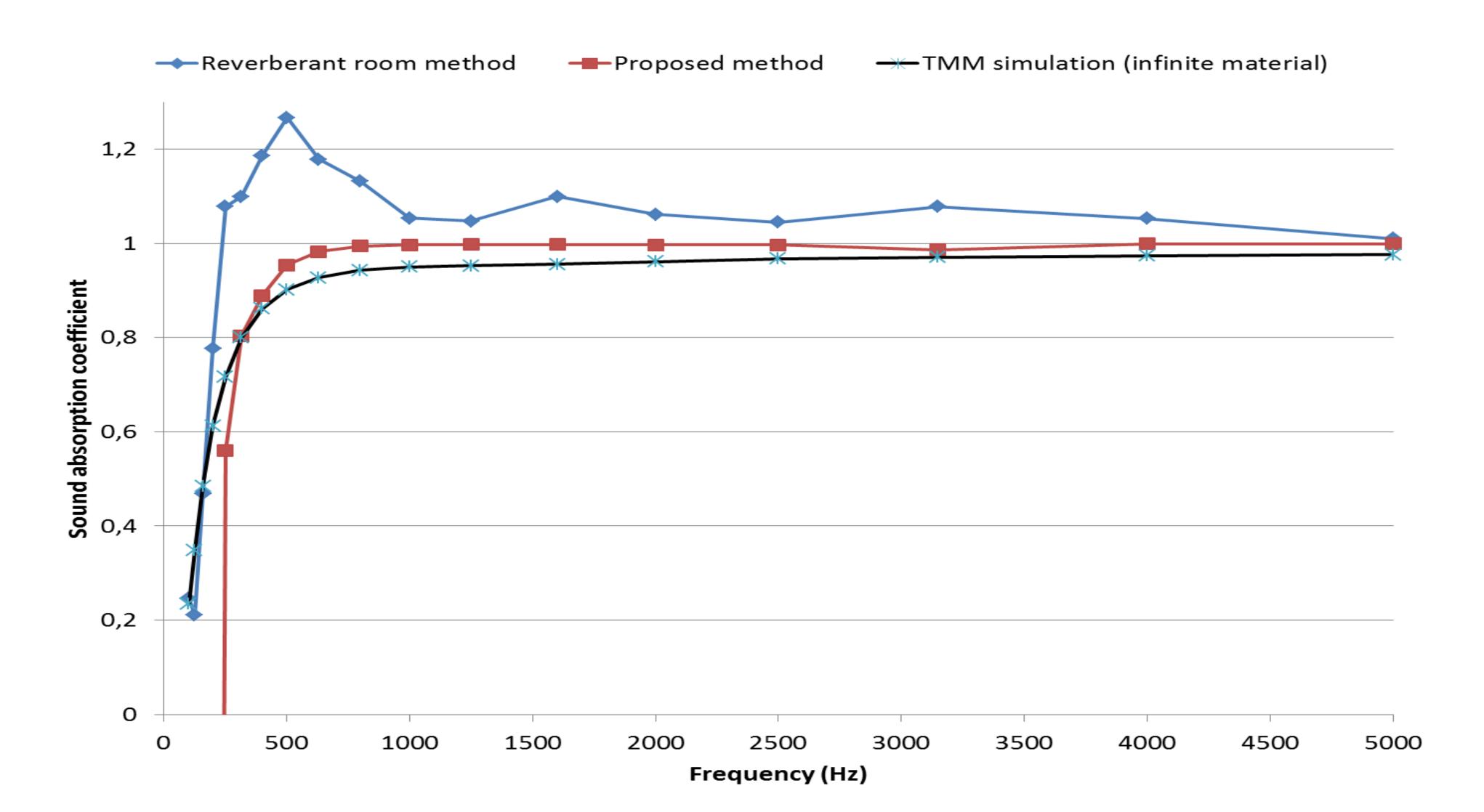
Cas de la mousse de polyuréthane



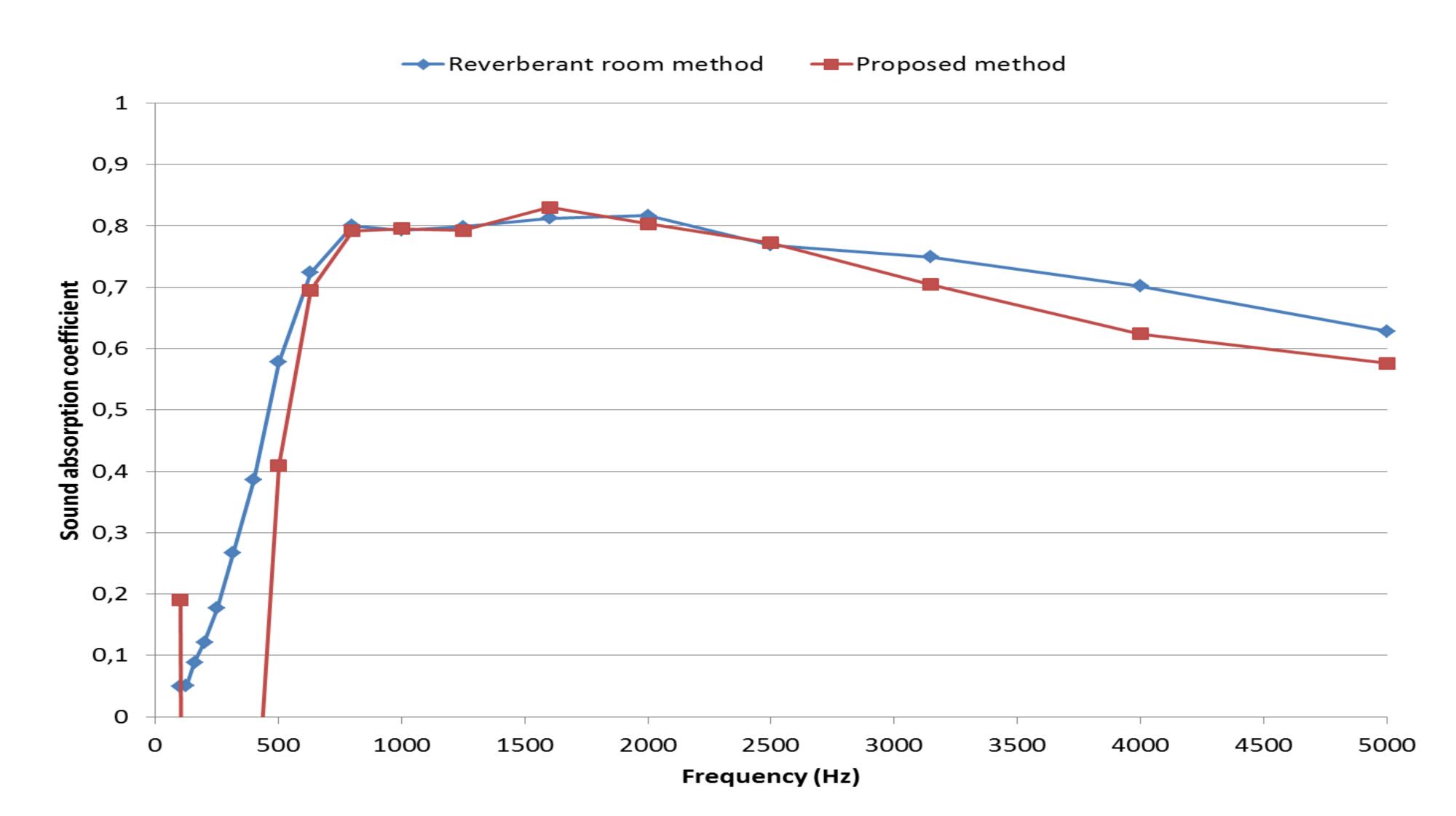
Cas de la laine de verre



Cas de la laine minérale



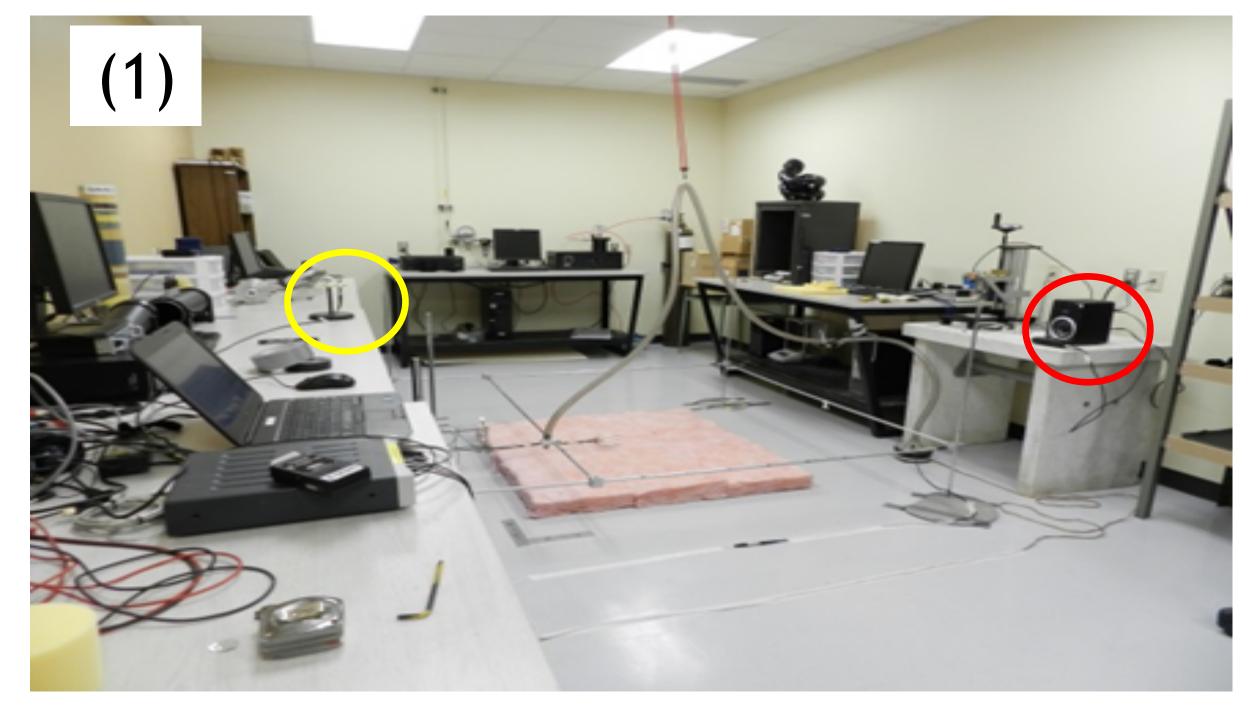
Cas des tuiles de plafond



Mesures in situ

Deux locaux hors laboratoire sont considérés :

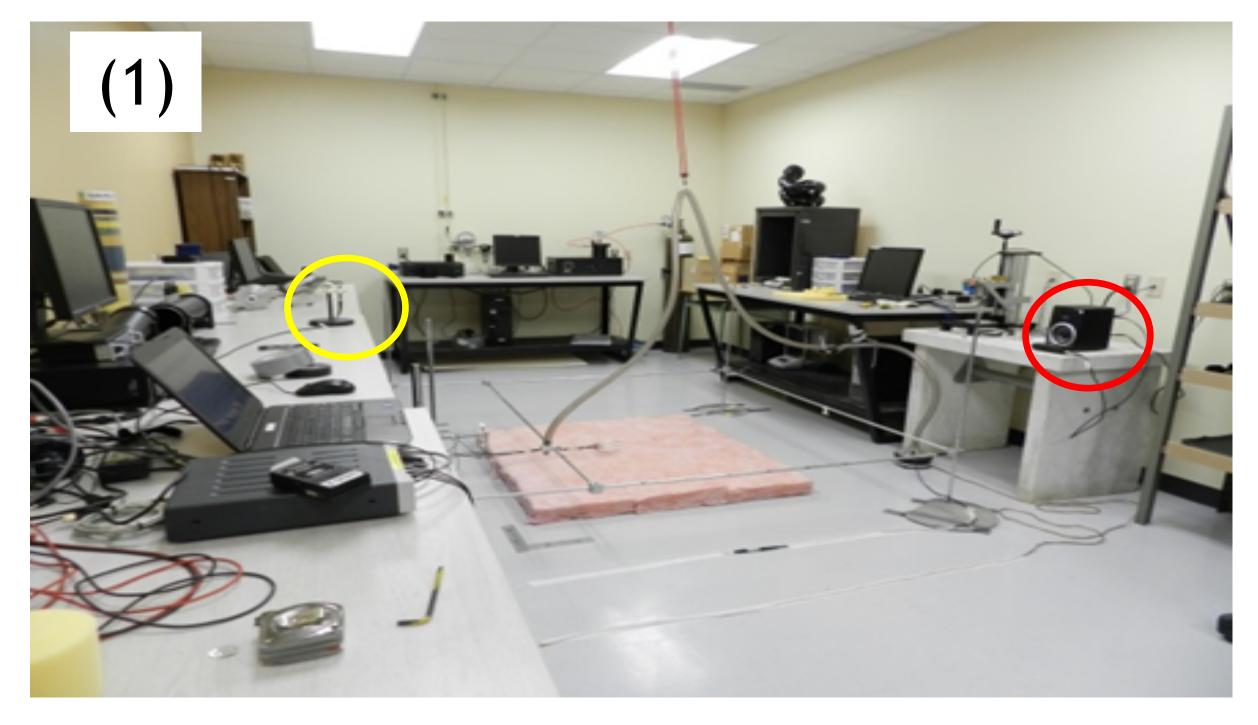
- (1) Un petit local de travail de 100 m³ -> temps de réverbération faible, surfaces réfléchissantes proches de la zone de mesure
- (2) Un atelier de fabrication de 3500 m³ -> temps de réverbération important, surfaces réfléchissantes éloignées de la zone de mesure



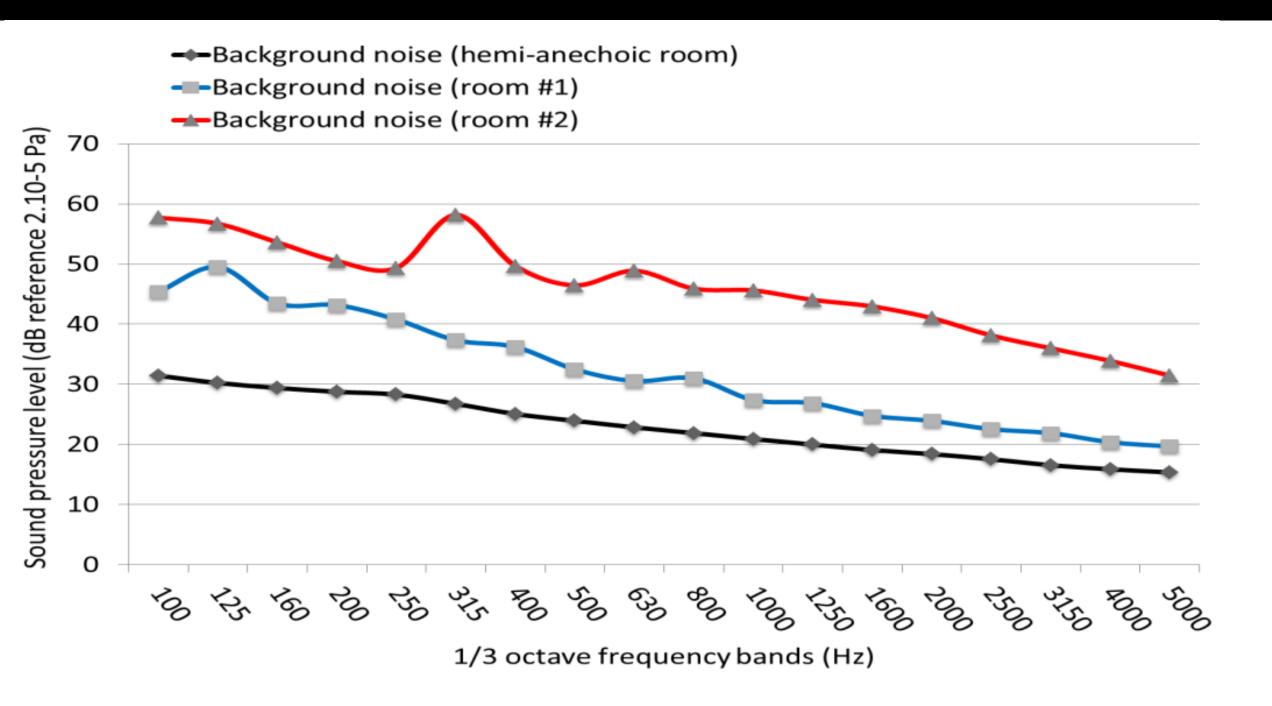


Deux locaux hors laboratoire sont considérés :

Un microphone de contrôle est positionné dans chaque local pour estimer le temps de réverbération, mesurer le niveau de bruit et <u>une source additionnelle de bruit</u> est placée dans le local #1

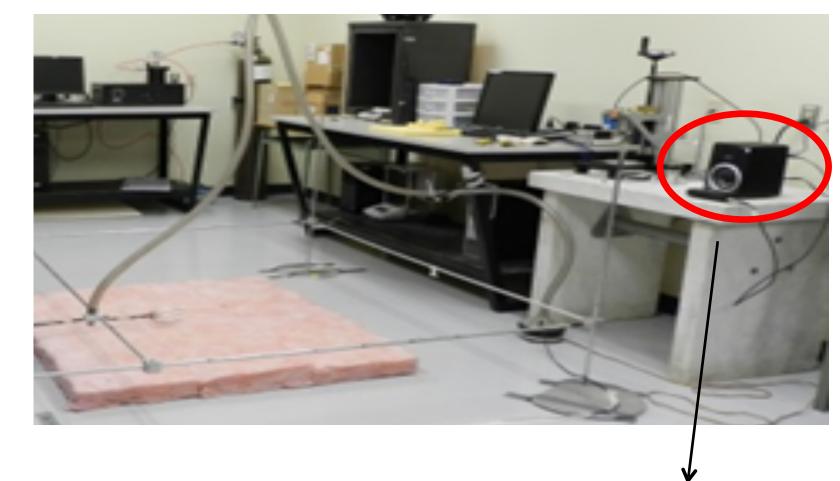


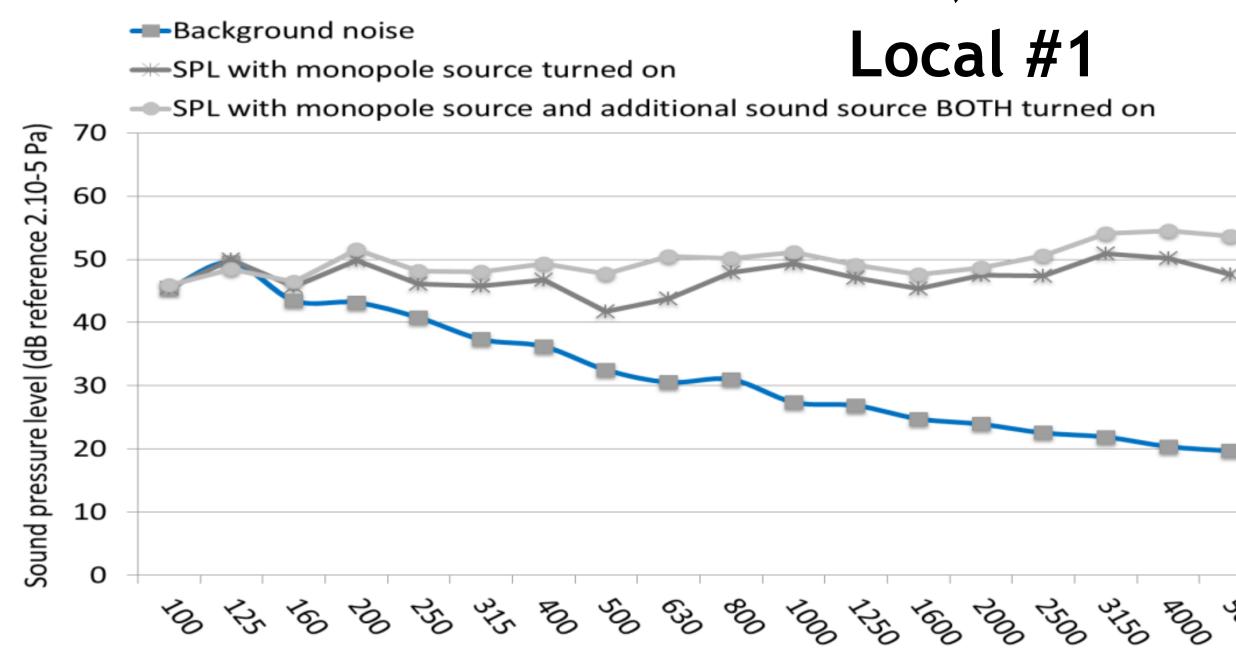




Temps de réverbération mesuré

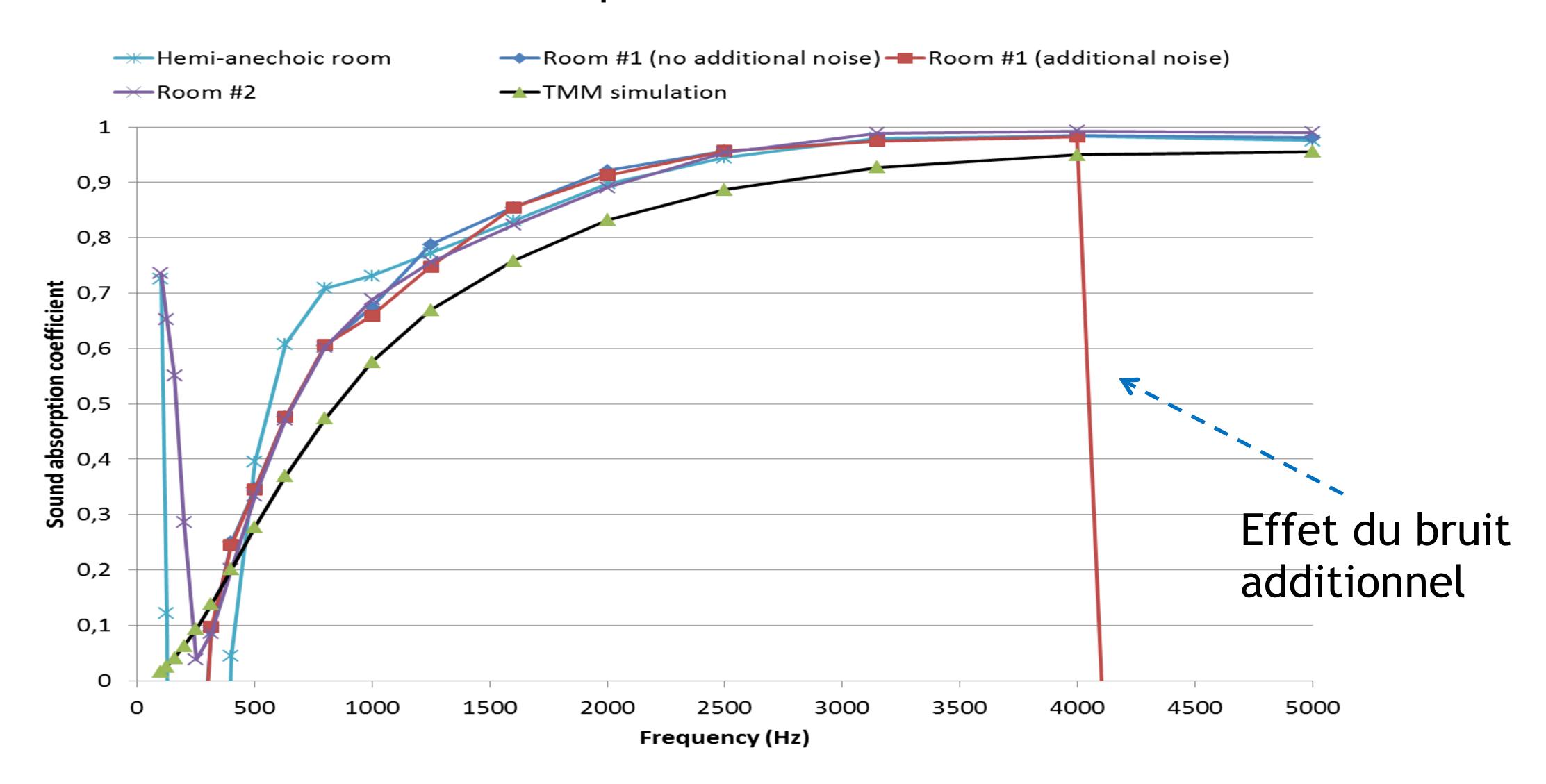
1/3 octave band	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Local #1	0,47 s	0,37 s	0,47 s	0,32 s	0,46 s	0,39 s
Local #2	-		1,1 s	1,29 s	0,83 s	0,66 s



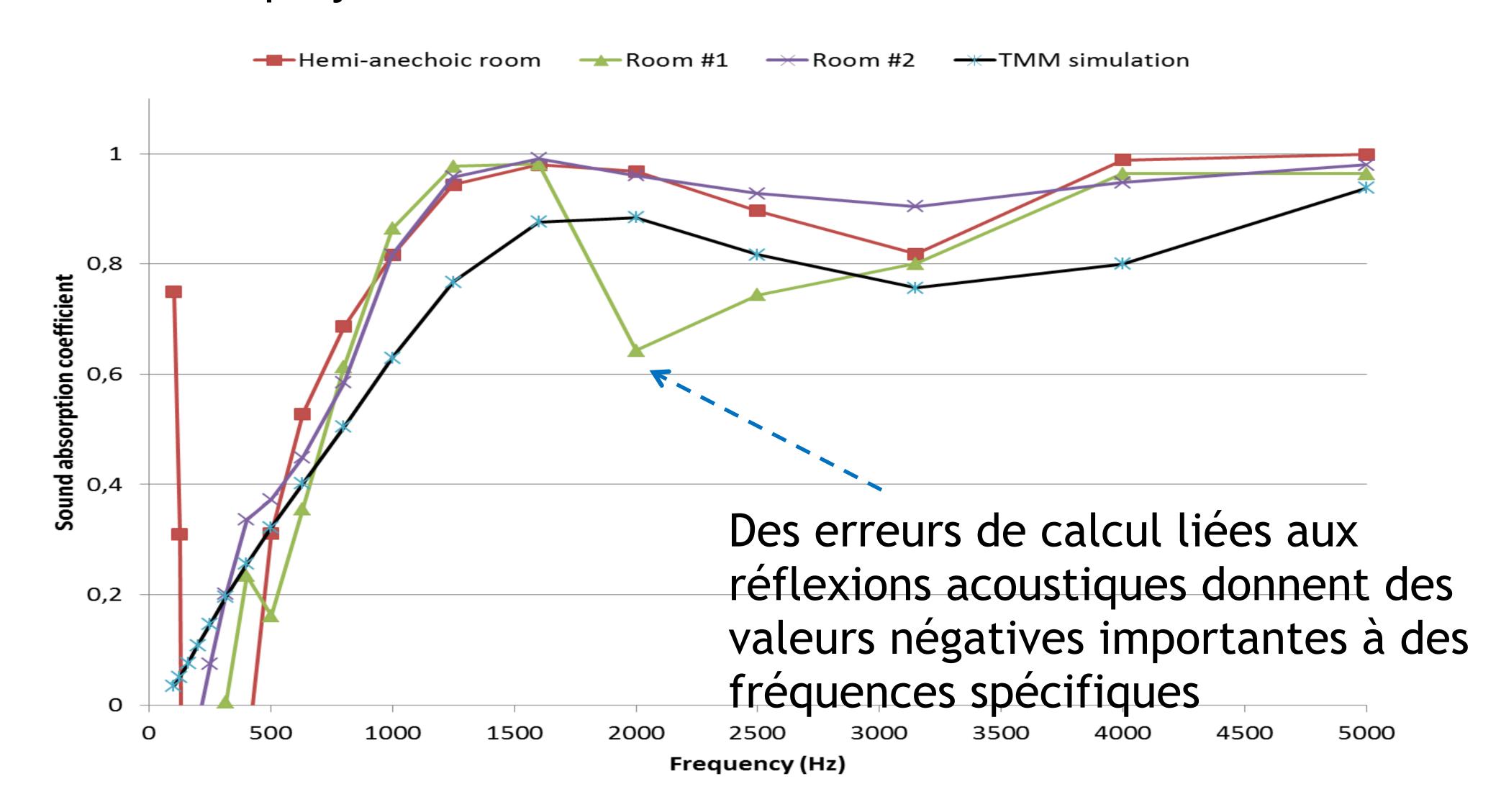


1/3 octave frequency bands (Hz)

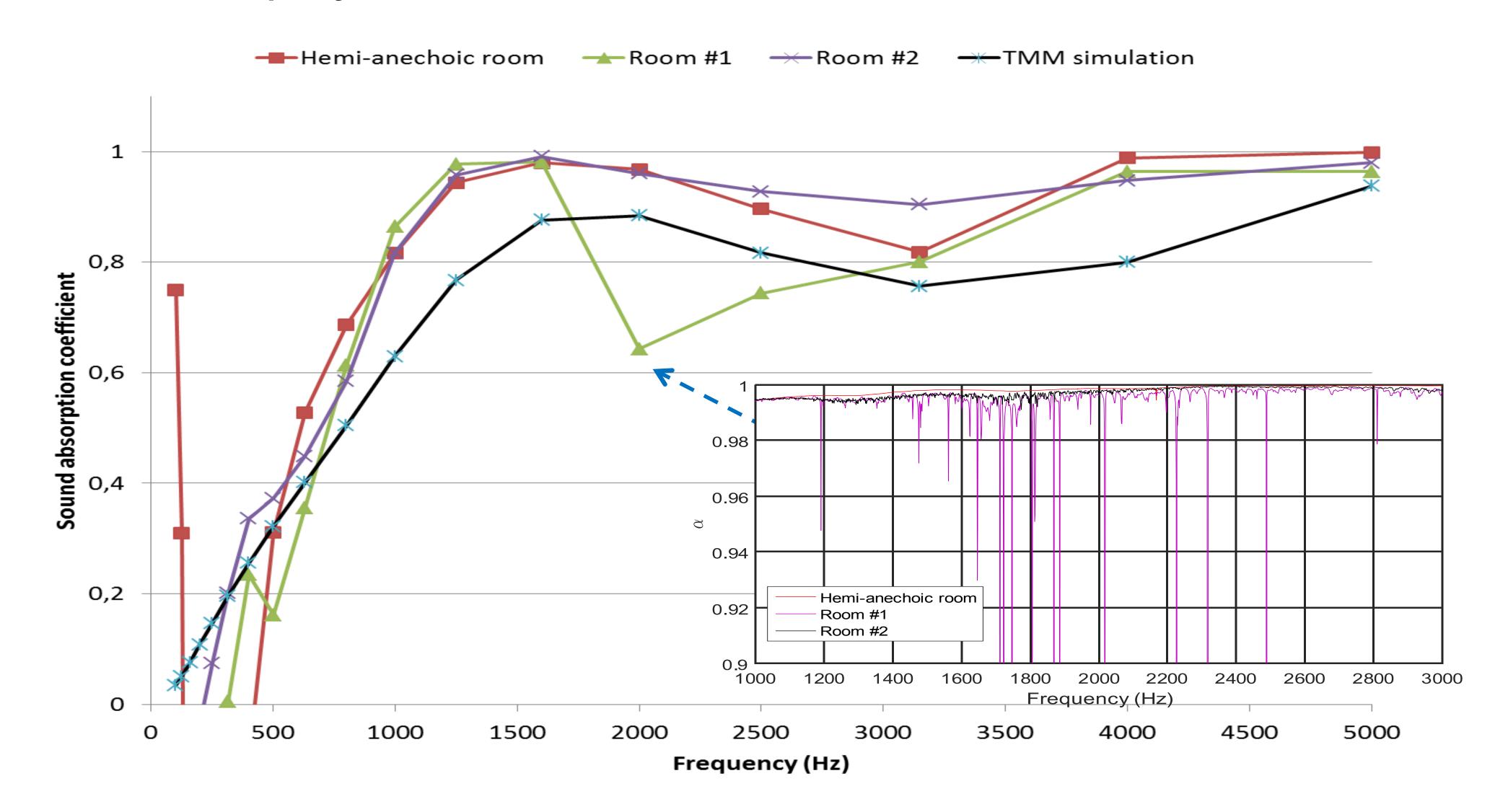
Cas du panneau en fibre de verre comprimée



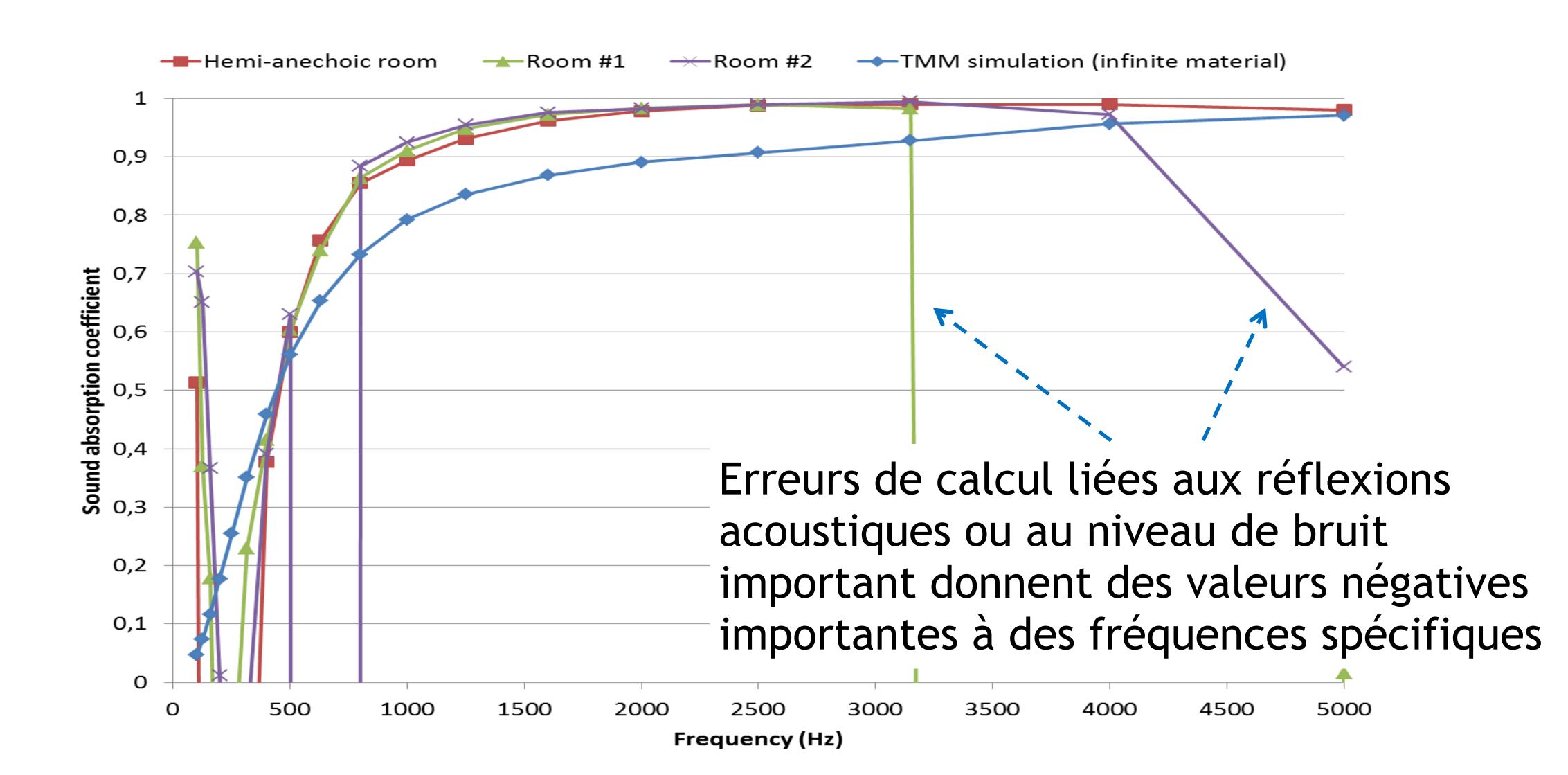
Cas de la mousse de polyuréthane



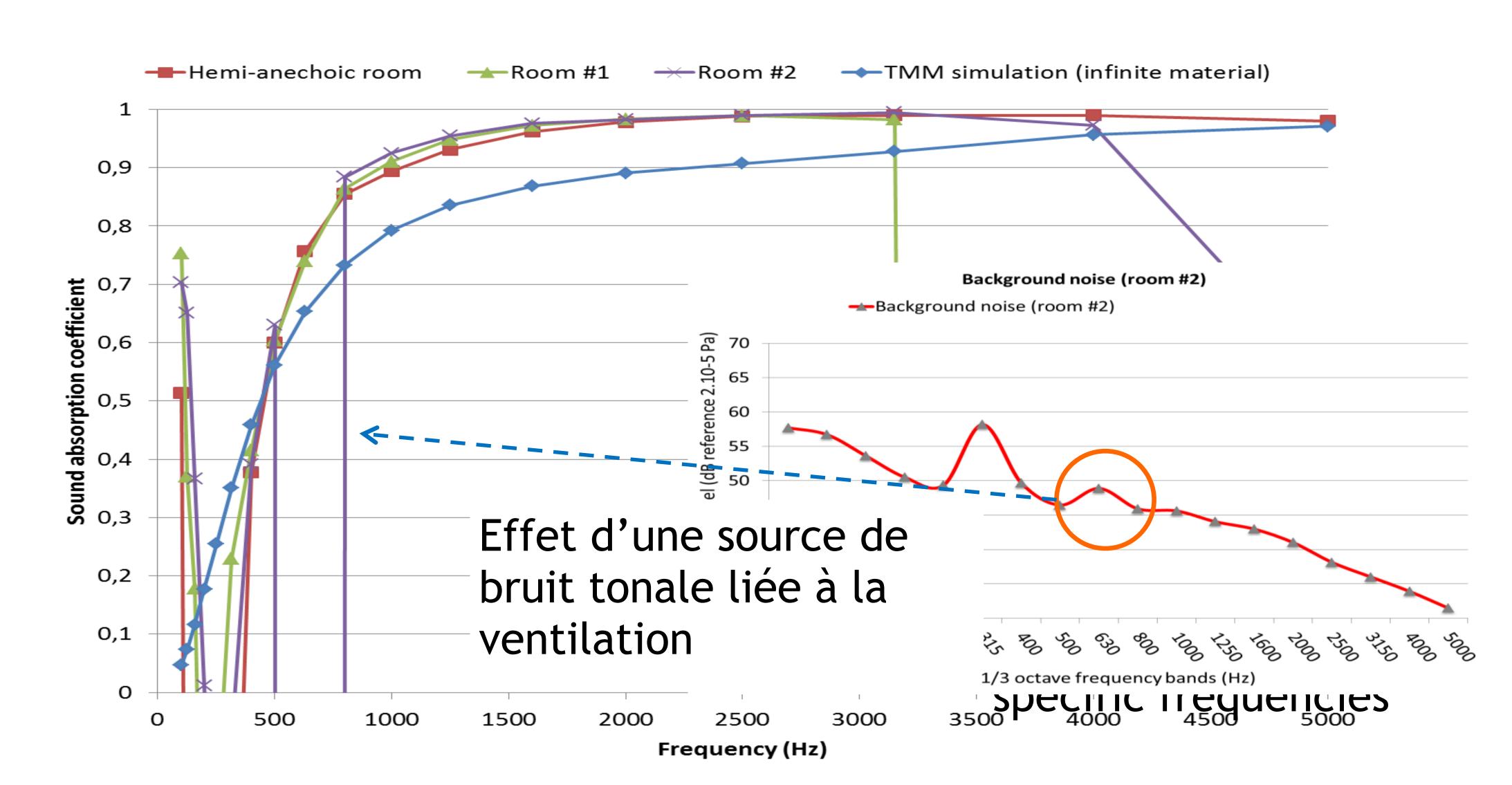
Cas de la mousse de polyuréthane



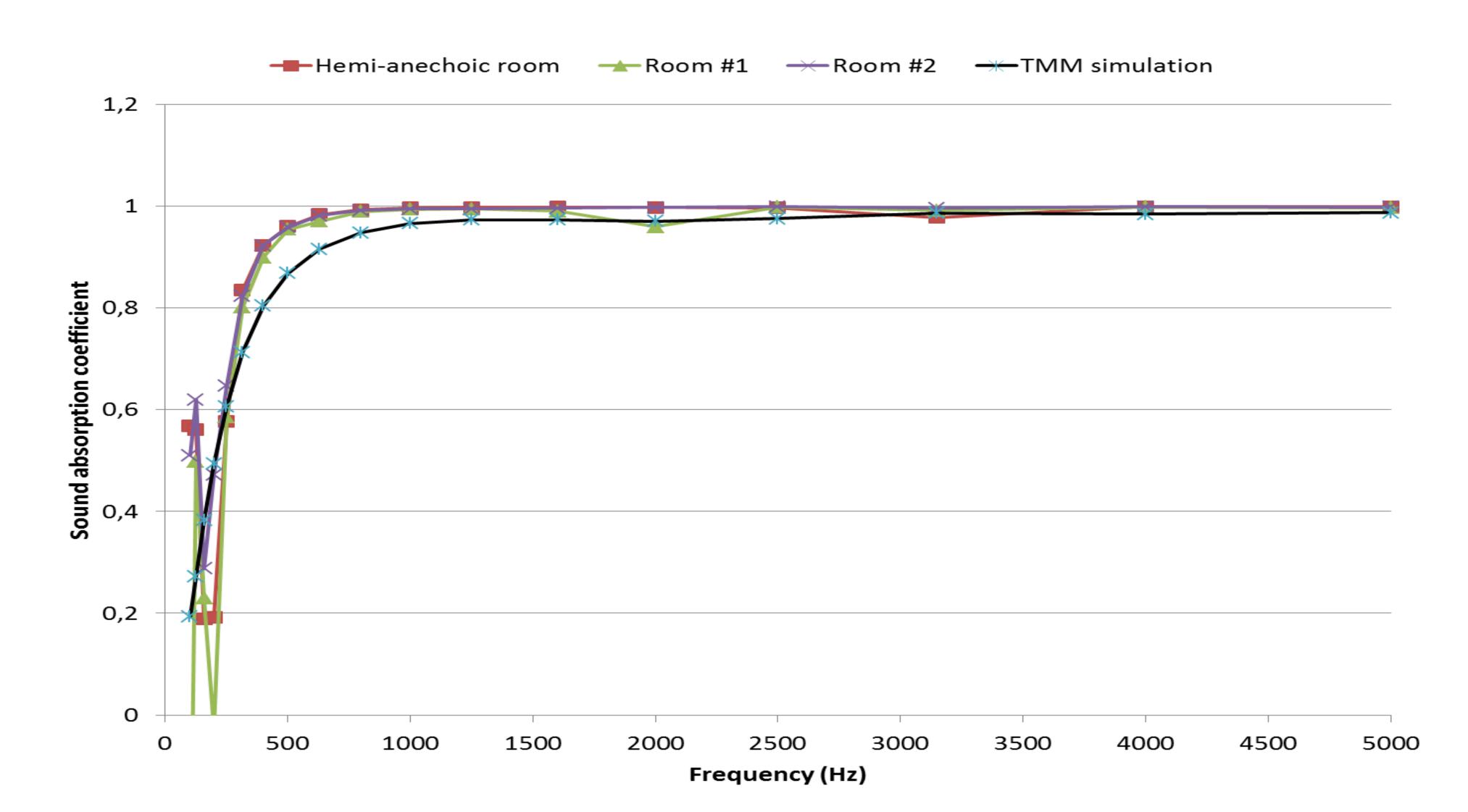
Cas de la mousse de mélamine



Cas de la mousse de mélamine

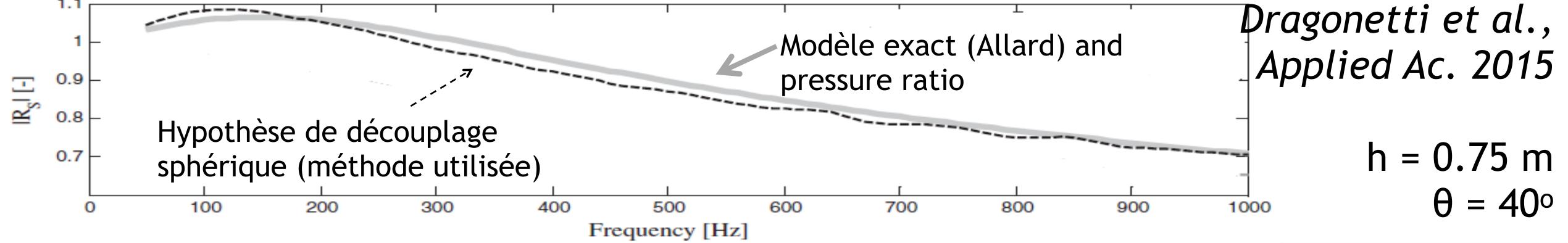


Cas de la laine de verre

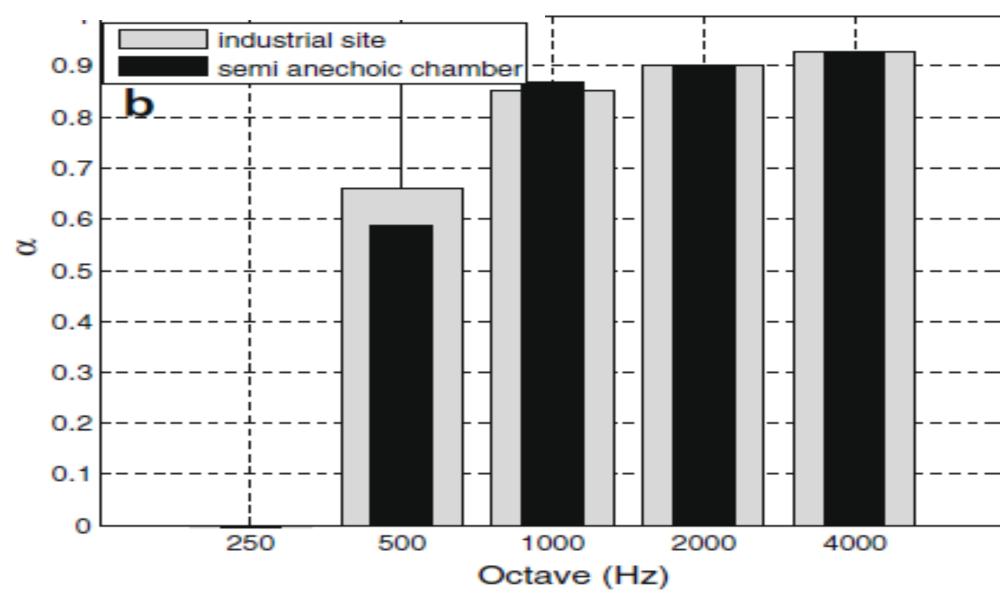


Amélioration de la méthode?

Parmi d'autres facteurs, le modèle de propagation simplifié utilisé pour le calcul du coefficient de réflexion est identifié comme étant la source



Une telle limitation en basse fréquence est vue dans d'autres travaux qui visent à mettre en œuvre une mesure in situ Ducourneau et al., Applied Acoustics 2009

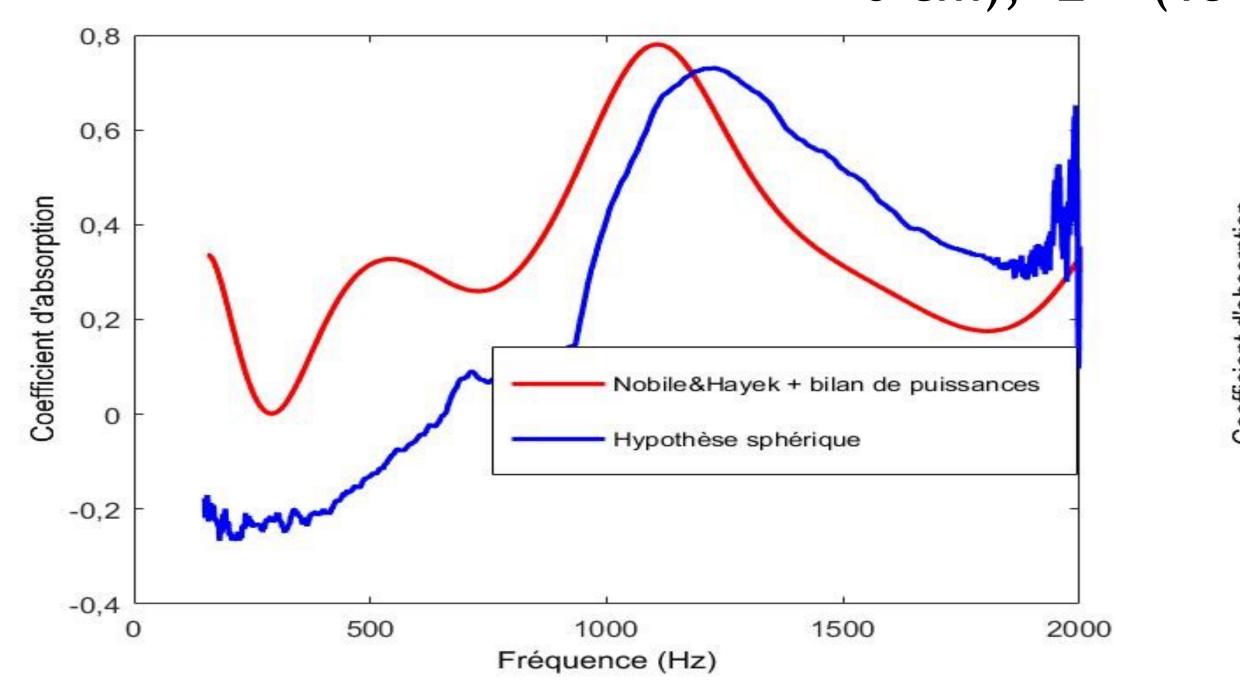


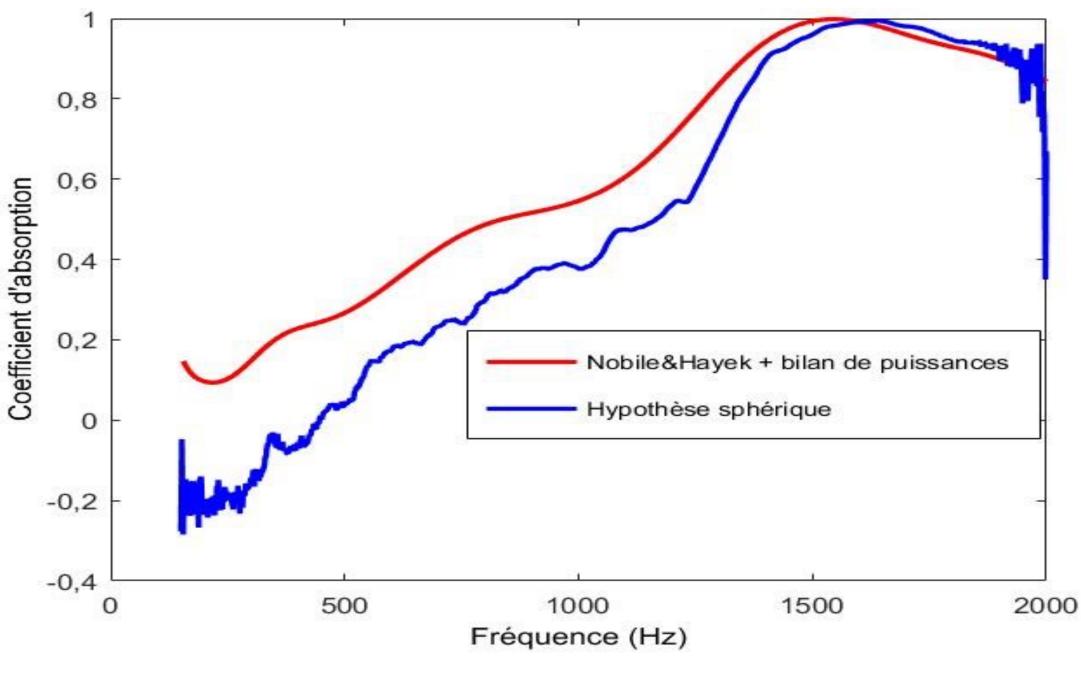
Antenne directionnelle de 13

Amélioration de la méthode?

Le modèle de Nobile-Hayek est utilisé avec une estimation du coefficient de réflexion basé en suivant d'équilibre des puissances acoustiques et comparé avec l'approche 'originale'

Panneau de fibre de verre comprimée - (deux points de test 1 = (0 cm, 0 cm); 2 = (15 cm, 15 cm)





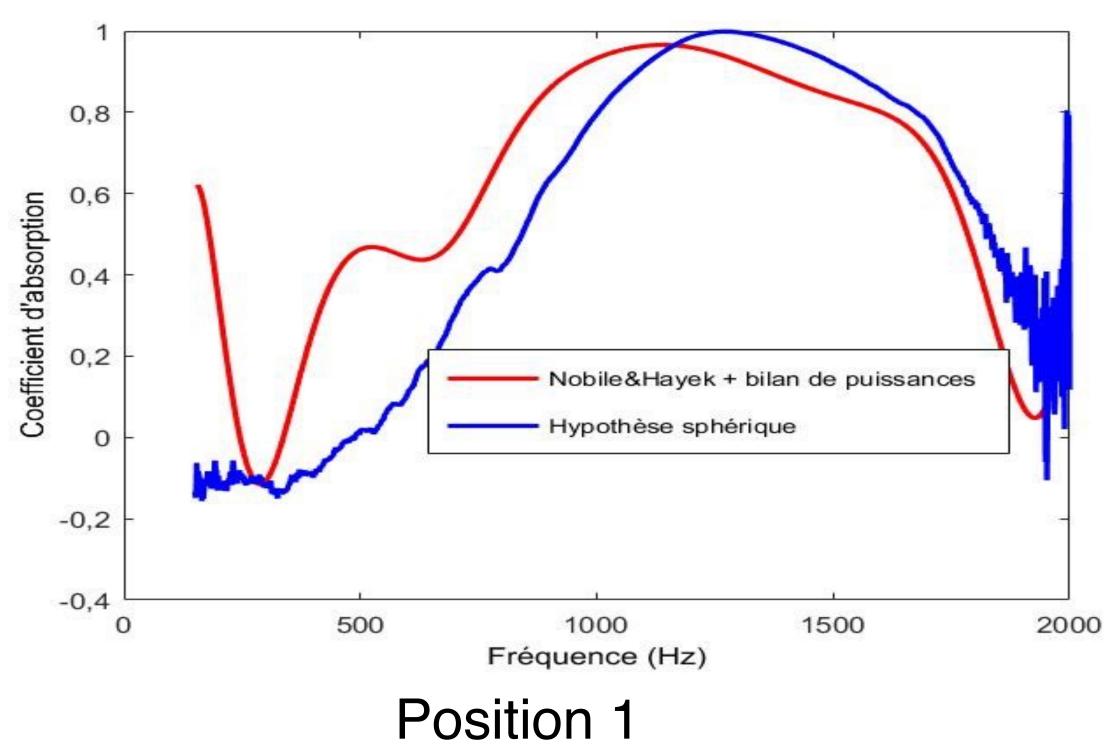
Position 1

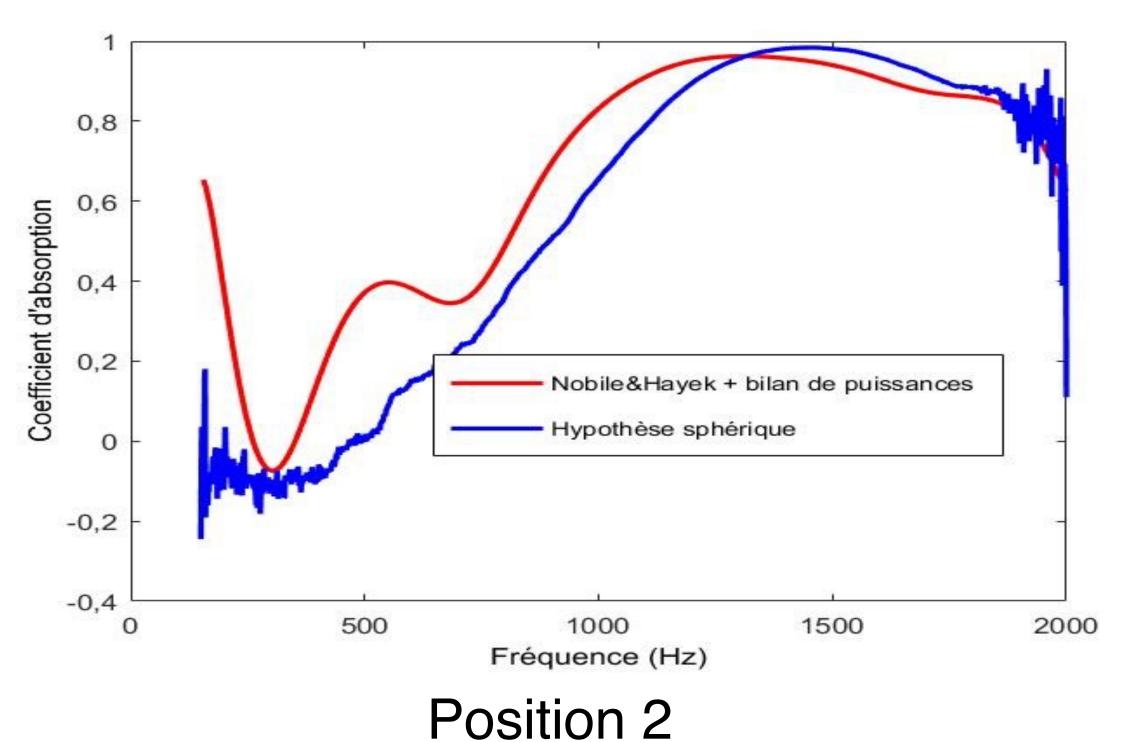
Position 2

Amélioration de la méthode?

Le modèle de Nobile-Hayek est utilisé avec une estimation du coefficient de réflexion basé en suivant d'équilibre des puissances acoustiques et comparé avec l'approche 'originale'

Mousse de polyuréthane - (deux points de test 1 = (0 cm, 0 cm); 2 = (15 cm, 15 cm)





Conclusion

- Principale conclusion : la mesure du coefficient d'absorption selon la méthode proposée permet de suggérer une alternative intéressante à la méthode de la chambre réverbérante.
- De 400 à 5000 Hz la méthode procure des valeurs de coefficient d'absorption proches de calculs numériques de référence tout en utilisant des surfaces de matériau beaucoup plus faibles que celles nécessaires en chambre réverbérante, et en éliminant la nécessité de préparer les échantillons.
- Les valeurs obtenues sont toujours dans une gamme physique (inférieures ou égales à 1), ce qui constitue également un point d'intérêt par rapport à la mesure standardisée de la chambre réverbérante qui procure souvent des valeurs non physiques
- Cette méthode se présente donc comme une alternative intéressante aux standards actuels en laboratoire.

Conclusion

- La méthode proposée montre une limite dans le domaine des basses fréquences (fréquence inférieure ou égale à 400 Hz environ), dont les origines sont globalement bien identifiées et pour laquelle une solution est proposée
- Hors laboratoire, la méthode montre toujours la même limite (en basses fréquences), mais permet l'obtention de résultats très homogènes par rapport à la mesure *en laboratoire*.
- Il est donc possible de s'éloigner d'un cas de mesure idéal, soit « en conditions contrôlées et proches de la théorie », pour se diriger vers des cas « pratiques » et proches de la réalité de tests concrets à réaliser en milieu de travail.

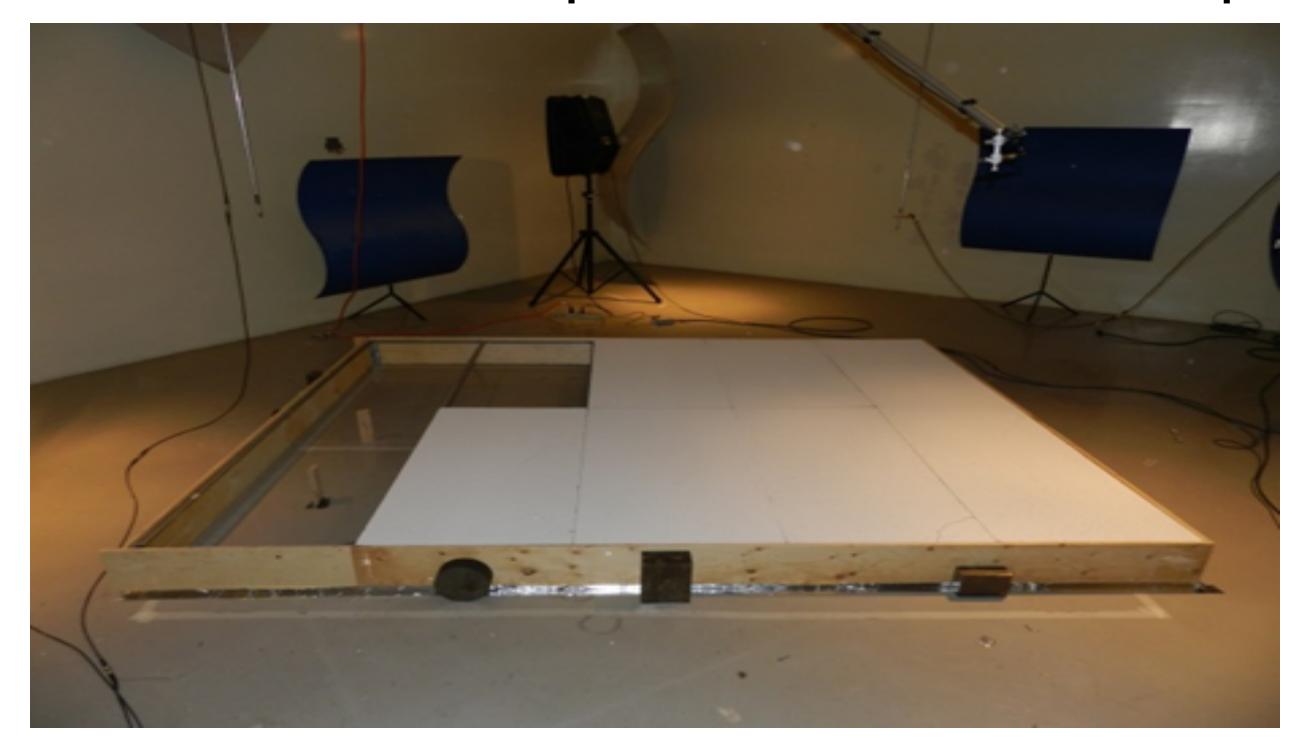
• Le rapport R-1022 présente la synthèse complète du travail effectué



- Merci pour votre attention
- Questions?

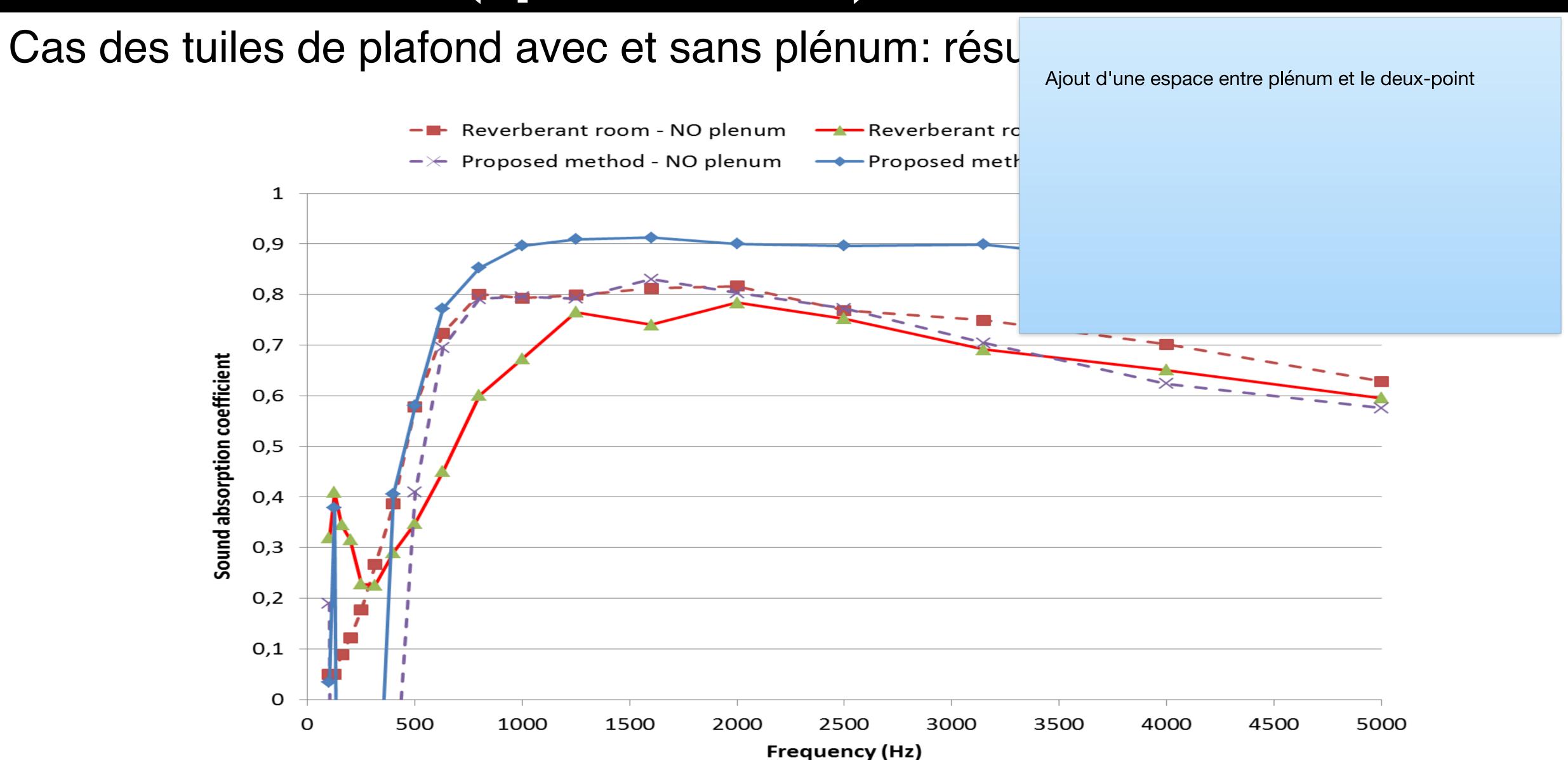
Au cas où... (questions)

Cas des tuiles de plafond avec et sans plénum





Au cas où... (questions)



Au cas où... (questions)

Is the synthesis effective ?

