



## **Comportement Vibro-Acoustique Basses Fréquences de Deux Cavités Fluides Couplées à une Structure Lourde : Comparaison des Résultats d'une Modélisation Eléments Finis et de Lois Empiriques**

D. Blon

CrittBois, 27, rue Philippe Séguin, 88051 Epinal, France  
david.blon@cribois.net

Les propriétés acoustiques et vibratoires des structures pour le bâtiment sont difficiles à prévoir aux basses fréquences, en raison de leur comportement modal marqué et du fait de leur complexité. Notre étude porte sur la confrontation des valeurs d'isolement entre deux cavités fluides entourées de parois lourdes, calculées d'une part via une modélisation éléments-finis à l'aide du logiciel libre FREEFEM++, et d'autre part via le logiciel ACOUBAT. Les résultats de cette étude préliminaire montrent que les modes de cavité ont une grande influence sur les valeurs d'isolement. Ces modes de résonance sont mis en évidence par les calculs éléments-finis, mais ne sont pas directement pris en compte par les lois de prédiction empiriques utilisées par ACOUBAT.

## 1 Introduction

### 1.1 Contexte

Les propriétés acoustiques et vibratoires des structures bois pour le bâtiment posent aujourd'hui des problèmes quant à leur prédiction<sup>[1]-[3],[6]-[9]</sup>, et malheureusement, le confort acoustique de ces structures ne peut réellement être apprécié qu'après l'achèvement du chantier. C'est donc dans le but d'aider à comprendre et prévoir ces phénomènes vibro-acoustiques qu'en 2011, suite à un appel à projets de l'ADEME, le projet VIBRACOUBOIS fut lancé par le CRITT Bois d'Épinal, le LAUM (Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine), ainsi que plusieurs partenaires industriels de la construction bois. Ce projet intègre donc des essais expérimentaux in-situ, le développement d'un protocole spécifique de mesure et d'identification des paramètres influents, ainsi que le développement en parallèle d'un code de calcul éléments-finis qui permettra de prévoir le comportement vibro-acoustique de ce type de structure.

### 1.2 Objectif

Les modèles numériques ont besoin d'être testés et validés sur des cas simples avant de pouvoir les intégrer à des noyaux de calculs plus complexes. C'est pourquoi nous avons décidé de tester la modélisation d'un problème couplé fluide-structure dans une configuration simple (matériaux lourds et homogènes), dont le comportement est connu, pour valider ces formulations et pouvoir ensuite les utiliser dans des structures plus complexes (structures légères).

De plus, l'intervalle de fréquence préconisé par les normes de l'acoustique du bâtiment pour effectuer les mesures ne tient pas compte des importants phénomènes de résonance et de couplage observés entre les cavités et la structure aux basses fréquences. Cette expérience va chercher à montrer leur importance et leur influence sur l'isolement aux basses fréquences.

### 1.3 Méthodologie

Notre étude s'axe donc autour de la confrontation des valeurs théoriques d'isolement entre deux cavités fluides entourées de parois lourdes, calculées d'une part via une modélisation éléments-finis à l'aide du logiciel libre FREEFEM++, et d'autre part via le logiciel ACOUBAT utilisant la norme NF EN 12354 de calcul de la performance acoustique des bâtiments pour une sollicitation aérienne (partie 1, Août 2000)<sup>[4]</sup>. Sur ce cas simple, les influences des divers chemins de propagation sur l'isolement acoustique global du système sont qualifiées, en mesurant en fonction de la fréquence les valeurs des vitesses quadratiques moyennes des parois des cavités, ainsi que la pression acoustique moyenne dans chacune des cavités.

TABLEAU 1 – Propriétés mécaniques des parois constituant les cavités.

	Planchers	Murs intérieurs	Façades
E(GPa)	27.0	27.0	27.0
$\nu$	0.2	0.2	0.2
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2300	1800	900
$m_s$ (kg/m <sup>2</sup> )	322	96	190
$\eta$ (%)	1.0	1.0	1.0
épaisseur (m)	0.14	0.12	0.1

## 2 Modèle éléments-finis

### 2.1 Paramètres de la modélisation

Le modèle éléments-finis (cf *figure 1*) a été créé de telle sorte qu'il soit le plus proche possible de la structure modélisée sous ACOUBAT. Il est donc constitué de deux cavités superposées, formées de trois types de parois lourdes en béton : planchers, façades et parois intérieures, chacune possédant ses propres caractéristiques mécaniques (cf *tableau 1*), similaires à celles utilisées sous ACOUBAT. Les dimensions de chaque cavité sont de 5.0 x 4.0 x 2.5 m.

Les conditions aux limites de la structure sont choisies comme étant libres, ce qui permet d'extraire les modes de résonance de la structure seule, sans les perturbations que peut engendrer la présence de points d'appuis.

Enfin, la modélisation éléments-finis est effectuée dans l'intervalle de fréquence 10-400 Hz, ce qui permet à la fois d'obtenir des résultats à des fréquences suffisamment hautes pour chevaucher une partie de l'intervalle d'étude couvert par les normes et ACOUBAT, tout en conservant la précision de la méthode des éléments-finis avec des temps de calculs non rédhibitoires.

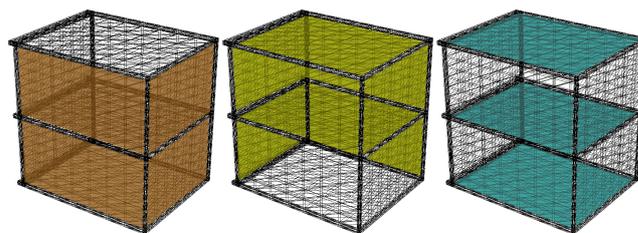


FIGURE 1 – **Maillage de la structure.** Les parois en orange forment les façades, celles en vert forment les parois intérieures, et celles en bleu forment les planchers.

## 2.2 Formulation matricielle d'un problème couplé fluide-structure

Le problème s'écrit sous sa forme matricielle de la manière suivante :

$$\begin{pmatrix} K - \omega^2 M & -C \\ -C^T & H/\omega^2 - Q \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ f \end{Bmatrix}$$

Avec :

- $K - \omega^2 M$  : matrice de raideur (K) et de masse (M), contenant les paramètres mécaniques caractérisant la structure solide.
- $H/\omega^2 - Q$  : matrices fluides H et Q caractérisant les cavités fluide.
- $-C$  et  $-C^T$  : matrices de couplage entre les milieux fluide et structure, permettant d'assurer une continuité des pressions et des déplacements entre les deux milieux.
- $u$  et  $p$  : respectivement les champs de déplacement (u) de la structure, et de pression (p) de l'air dans les cavités, qui sont les inconnues du système.
- $f$  : les contraintes initiales, qui dans notre cas sont des déplacements imposés dans le milieu fluide, ce qui génère une onde de pression et donc du son (à la manière d'un haut-parleur).

## 3 Modèle normatif / Acoubat

### 3.1 Principe

Le logiciel ACUBAT possède une importante base de données des propriétés mécaniques et acoustiques de matériaux, de parois et de jonctions utilisés en construction, ce qui lui permet, via des lois de calcul empiriques, d'effectuer une prédiction des qualités acoustiques de parois et d'assemblages de parois. L'intérêt de ce principe est que les modélisations se basent donc sur des paramètres mécaniques et acoustiques issus de mesures réelles en laboratoire. En revanche, le couplage entre le fluide (l'air) et la structure n'est pas pris en compte par les lois empiriques ce qui empêche d'évaluer l'impact des modes de résonance des cavités, particulièrement importants aux basses fréquences.

### 3.2 Lois empiriques : définitions

#### 3.2.1 Grandeur permettant d'exprimer les performances d'un bâtiment

Isolement acoustique standardisé (en dB) :

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (1)$$

où  $L_1$  et  $L_2$  sont respectivement les niveaux de pression acoustique moyenne (en dB) des locaux d'émission et de réception, T est la durée de réverbération du local

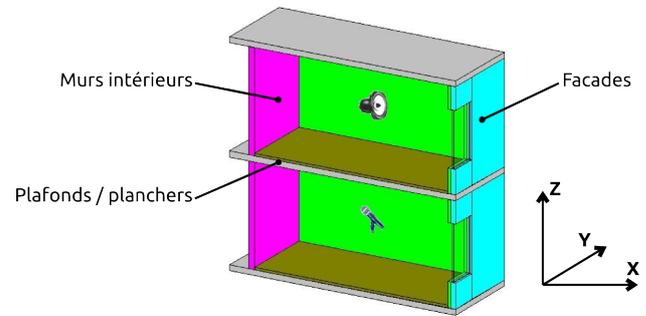


FIGURE 2 – Vue 3D en coupe de la structure modélisée sous ACUBAT.

de réception, exprimée en secondes, et  $T_0$  est la durée de réverbération de référence, pour les habitations, égale à 0,5 s.

Durée de réverbération (en s) :

$$T = 0,16 \cdot \frac{V}{\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i} \quad (2)$$

où  $V$  est le volume total de la cavité (en  $m^3$ ),  $\alpha_i$  le coefficient d'absorption de la surface  $i$ ,  $S_i$  l'aire de la paroi  $i$ , et la somme est effectuée sur les  $n$  parois de la cavité.

#### 3.2.2 Grandeur permettant d'exprimer les performances d'une paroi

Indice d'affaiblissement acoustique (en dB) :

$$R = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{W_1}{W_2}\right) \quad (3)$$

où  $W_1$  est la puissance acoustique incidente sur un échantillon et  $W_2$  la puissance acoustique transmise.

### 3.3 Structure étudiée

La figure 2 présente une vue en coupe de la structure modélisée sous ACUBAT. On peut voir sur cette figure le local supérieur qui est celui d'émission de l'onde sonore aérienne, et le local inférieur qui est celui de réception. Les propriétés des parois sont celles détaillées dans le tableau 1. L'étude est réalisée sur l'intervalle 100-5000 Hz et les résultats pourront être filtrés en tiers d'octave.

## 4 Résultats

### 4.1 Modélisation éléments-finis : structure libre

En mesurant les vitesses quadratiques des parois en fonction de la fréquence (figure 4), on s'aperçoit que les résonances observées sont de deux types :

- les résonances "globales", où l'on observe un comportement similaire de toutes les parois et où le couplage est fort avec les cavités. En effet on observe que les pics de résonance de la structure coïncident avec ceux de la cavité fluide (ex : 34 Hz, 42 Hz, 54 Hz, 76 Hz).

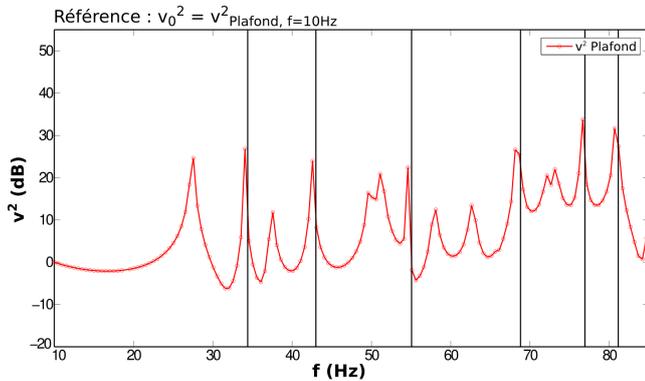


FIGURE 3 – Vitesse quadratique du plafond seul en fonction de la fréquence. On observe ici l'influence qu'ont les modes de cavité (traits noirs verticaux) sur les modes de résonance des parois (ici le plafond, en rouge).

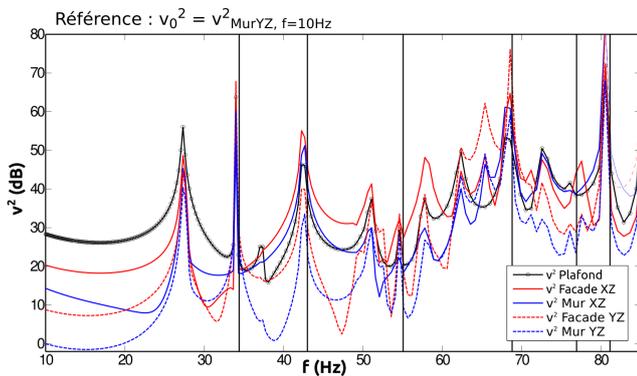


FIGURE 4 – Vitesse quadratique des parois en fonction de la fréquence. On distingue deux types de pics de résonance : les résonances "globales" de la structure, ayant un fort couplage avec les cavités, et les résonances plus "locales", où seulement une partie des parois résonne.

- les résonances "locales", où seulement une partie des parois entre en résonance, et où donc le couplage avec les cavités est faible (ex : 37 Hz, 50 Hz, 51 Hz, 66 Hz).

A noter l'exception du premier pic (figure 3 et 4), situé à 28 Hz, qui serait le premier mode de résonance du plancher/plafond. En effet on observe à cette fréquence un niveau vibratoire plus important que sur les autres parois. Le premier mode de résonance possédant une forte amplitude, il transmet également aux autres parois, via les jonctions, un fort niveau vibratoire. L'étude de ce pic devrait nous permettre d'extraire beaucoup d'informations concernant les jonctions.

#### 4.2 Modélisation éléments-finis / Acoubat : comparaison des isolements

On peut voir sur la figure 5 le tracé de l'isolement acoustique standardisé entre les cavités, obtenu d'une part par la méthode des éléments-finis, et de l'autre par les lois empiriques utilisées par les normes de l'acoustique du bâtiment. Plusieurs facteurs expliquent le décalage que l'on observe entre les courbes rouge (FREEFEM) et noire (ACOUBAT).

Tout d'abord, les jonctions et les interfaces entre le fluide

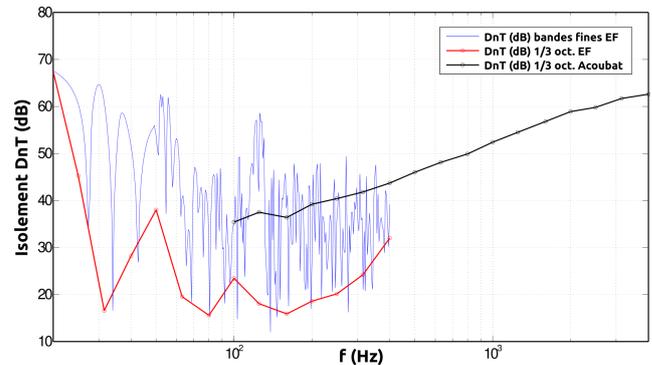


FIGURE 5 – Isolement en fonction de la fréquence - Comparaison modélisation éléments-finis / ACOUBAT, avec en bleu et en rouge les résultats respectivement en bandes fines et tiers d'octave issus de FREEFEM, et en noir les résultats en tiers d'octave issus d'ACOUBAT.

et les parois sont idéalisées sous FREEFEM. En effet, les pertes au niveau de celles-ci ne sont pas considérées, alors qu'elles sont importantes dans la réalité. ACOUBAT en revanche se base sur des mesures acoustiques de jonctions et de parois réelles, dont une partie non négligeable de l'énergie vibratoire qui transite à travers est dissipée. Les valeurs d'isolement obtenues grâce aux modélisations FREEFEM sont donc sous-évaluées du fait d'un amortissement faible.

De plus, ces valeurs d'amortissement induisent que les pics de résonance observés sur les courbes issues des modélisations éléments-finis (cf. figure 5) sont étroits et possèdent une grande amplitude, ce qui tend à faire diminuer les résultats du filtrage en tiers d'octave, et donc descendre la courbe rouge.

Enfin, on observe sur les courbes issues de la modélisation éléments-finis une diminution de l'isolement sur l'intervalle 100-150 Hz, ce qui correspond à l'estimation de la valeur de la fréquence critique ( $f_c \approx 132$  Hz) de la paroi plafond/plancher. Cette observation nous conforte dans l'idée que les résultats issus de la modélisation éléments-finis sont cohérents, et qu'un simple ajustement des paramètres en fonction de la structure étudiée nous permettrait d'obtenir des résultats représentatifs du comportement vibro-acoustique de la structure.

#### 4.3 Modélisation éléments-finis : influence des modes de résonance sur l'isolement

La figure 6 focalise sur la partie très basses fréquences (20-100 Hz) de la figure 5.

On observe ici tout d'abord la forte influence sur les valeurs d'isolement des modes de cavité (traits verticaux). En effet, les valeurs les plus basses d'isolement en bandes fines (courbe bleue), coïncident avec ces modes de cavité.

On observe par ailleurs que la courbe rouge (filtrage tiers d'octave) a une forte tendance à lisser les pics de résonance sur tout l'intervalle fréquence. On constate donc une importante perte d'informations concernant la position des pics de résonance et leur amplitude. Ces pics pouvant être reliés à des modes de résonance des cavités ou de

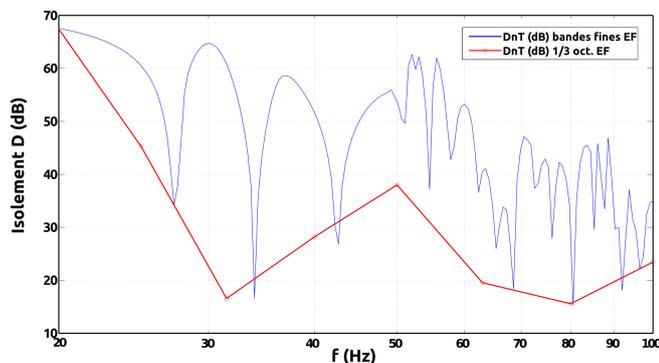


FIGURE 6 – Isolement en fonction de la fréquence sur l'intervalle 20-100 Hz - Modélisation éléments-finis, avec l'isolement issu de FREEFEM en bandes fines (courbe bleue) et filtré en tiers d'octave (courbe rouge).

la structure, ils représentent une information physique importante à prendre en compte pour l'interprétation des résultats.

## 5 Conclusions

### 5.1 Modélisation éléments-finis

La modélisation éléments-finis nous a permis de mettre en évidence deux types de résonance aux basses fréquences (cf figure 4) : des résonances "globales" de la structure, ayant un fort couplage avec les cavités, où l'on observe un comportement similaire entre toutes les parois et où leurs fréquences de résonance coïncident avec celles des modes de cavité, et des résonances "locales" où seulement une partie des parois résonnent, à des fréquences situées en dehors des modes de cavité, et qui sembleraient donc correspondre à des modes propres de la structure solide.

Ces modes "globaux" résultent d'un fort couplage entre les cavités et la structure (cf figure 3), et impactent donc fortement les valeurs d'isolement entre les cavités. Par ailleurs, aux très basses fréquences, seule une étude en bandes fines permet d'observer la réelle influence de ces modes sur les mesures d'isolement (cf figure 6). Il semblerait donc judicieux d'utiliser, pour des études allant en dessous de 100 Hz, des données en bandes fines plutôt qu'en tiers d'octave.

### 5.2 Comparaison éléments-finis / Acoubat

On observe un décalage entre les courbes issues de la modélisation éléments-finis et d'ACOUBAT (cf figure 5). Ce décalage s'explique par la non prise en compte sous FREEFEM des phénomènes de dissipation de l'énergie au niveau des jonctions et des interfaces entre fluide et parois pour obtenir l'isolement entre les cavités.

On remarque de plus une diminution de l'isolement sur l'intervalle 100-150 Hz qui correspond à la valeur de la fréquence critique pour la paroi plancher/plafond. Cette observation nous conforte dans l'idée que les modèles utilisés dans la modélisation éléments-finis sont pertinents, et que le modèle semble bien se comporter.

## 5.3 Perspectives

De nouveaux calculs éléments-finis doivent être réalisés mais cette fois-ci en ajustant les paramètres, en particulier d'amortissement au niveau des jonctions et des interfaces fluide-structure, de manière à rattraper le décalage entre les courbes d'isolement (cf figure 5).

## Références

- [1] *Low-frequency vibration measurements on LTF floors*, 2006. Proceedings of Inter-Noise 2006, Honolulu, Hawaii USA.
- [2] *FE modelling of wooden building assemblies*, 2010. Proceedings of Inter-Noise 2010, Lisbon, Portugal.
- [3] *In situ testing of timber floor vibration properties*, 2010. Proceedings of WTCE 2010.
- [4] *NF EN 12354-1 : Calcul de la performance acoustique des bâtiments à partir de la performance des éléments, partie 1 : isolement acoustique aux bruits aériens entre des locaux*, Août 2000.
- [5] *NF EN 12354-6 : Calcul de la performance acoustique des bâtiments à partir de la performance des éléments, partie 6 : absorption acoustique des locaux*, Août 2004.
- [6] Åsa Bolmsvik. Structural vibration of wooden house walls. *Journal of Building Acoustics*, 13 :285–293, 2006.
- [7] Åsa Bolmsvik. Evaluation of vibration distribution from a full scale measurement in an eight storey wooden house. *Proceedings of ISMA 2008*, Civil Applications, 2008.
- [8] Åsa Bolmsvik and T. Ekevid. Flanking transmission in a timber-framed building - a comparison of structural vibration in measurements and fe analyses. *Paper Submitted in January 2013*, 2013.
- [9] Åsa Bolmsvik, Torbjörn Ekevid, and Anders Olsson. Measurement of vibration distribution. Technical report, Växjö University, 2009.
- [10] Manuel Technique d'Acoubat V6.0.9. Cstb. 2010.
- [11] Page internet du logiciel Acoubat V6.0. <http://boutique.cstb.fr/fr/logiciels/acoustique/acoubat-sound-2010-v6-0.html>. consultée le 20.03.2014.
- [12] Page internet du logiciel FreeFem++ V3.29. <http://www.freefem.org/ff++/>. consultée le 20.03.2014.