



**HAL**  
open science

**Étude du vieillissement du bois dans les instruments de musique dans une optique de conservation préventive.  
Effet de l'âge et des contraintes mécaniques et hygrothermiques appliquées en fonction des conditions de jeu. 1er rapport d'étape**

Iris Brémaud, Joseph Gril

► **To cite this version:**

Iris Brémaud, Joseph Gril. Étude du vieillissement du bois dans les instruments de musique dans une optique de conservation préventive. Effet de l'âge et des contraintes mécaniques et hygrothermiques appliquées en fonction des conditions de jeu. 1er rapport d'étape. 2011. hal-00566277

**HAL Id: hal-00566277**

**<https://hal.science/hal-00566277>**

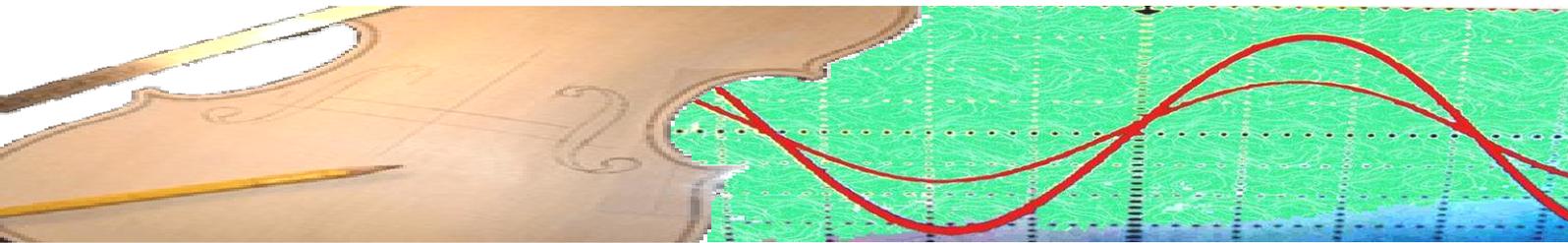
Submitted on 15 Feb 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Etude du « Vieillissement » du bois dans les instruments de musique dans une optique de conservation préventive:**

*Effet de l'âge du matériau et des contraintes mécaniques et hygrothermiques appliquées en conditions de conservation ou de jeu.*



**1<sup>er</sup> rapport d'étape :**

**Validation d'un dispositif de mesure des propriétés viscoélastiques et essais d'applicabilité aux bois**

**Iris BREMAUD, Joseph GRIL**

Projet associant :

*Laboratoire de Recherche et de Restauration du Musée de la Musique, Cité de la Musique, Paris*

*Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, Equipe Mécanique de l'Arbre et du Bois, CNRS-UMII, Montpellier*

*LMT-Cachan, ENS-Cachan, CNRS, U. Paris 6  
Laboratoire d'Acoustique Musicale, CNRS-UPMC, Paris*

*Janvier 2005*

Sommaire :

<b>I. INTRODUCTION</b>	<b>2</b>
PROBLEMATIQUE GENERALE	2
PROBLEMATIQUE DE LA PREMIERE PHASE DE TRAVAIL	2
ORGANISATION MATERIELLE ET HUMAINE	3
<b>II. MATERIEL ET METHODES</b>	<b>3</b>
<b>II.A. MATERIEL</b>	<b>3</b>
II.A.1. REFERENCES	3
II.A.2. ECHANTILLONNAGE DE BOIS POUR L'ETALONNAGE	4
<b>II.B. METHODE</b>	<b>5</b>
II.B.1. MONTAGE UTILISE	5
II.B.2. SOURCES POSSIBLES D'ERREURS	5
<b>III. PREMIERS RESULTATS</b>	<b>6</b>
<b>III.A. EFFETS DES PARAMETRES EXPERIMENTAUX</b>	<b>6</b>
III.A.1. CAPTEURS	6
III.A.2. COUPLAGE TRANSDUCTEURS/EPROUVETTE	8
<b>III.B. REPETABILITE</b>	<b>8</b>
<b>III.C. ETALONNAGE POUR LE MODULE D'YOUNG ET VALEURS DE DEPHASAGE, SUR DIFFERENTS BOIS</b>	<b>11</b>
<b>IV. CONCLUSION PROVISoire ET PERSPECTIVES</b>	<b>13</b>
<b>V. ANNEXE</b>	<b>14</b>
CD DES FICHIERS D'ESSAIS SOUS MATLAB, COMPRENANT LE LISTING DES FICHIERS D'ESSAIS, AVEC CONDITIONS EXPERIMENTALES, VALEURS INITIALES RELEVees, ET OBSERVATIONS (« LISTING FICHIERS MATLAB ET CONDITIONS EXPERIMENTALES.XLS »)	14

# I. Introduction

## Problématique générale

Une collection patrimoniale d'instruments de musique telle celle du Musée de la Cité de la Musique pose un double problème de conservation et d'accès au public des oeuvres. D'une part les conditions de conservation et/ou d'exposition doivent obéir aux mêmes règles de sécurité des objets que pour toute collection. D'autre part, la fonction de témoin historique, comme la fonction d'oeuvre d'art, des instruments de musique impliquent non seulement le visuel, mais très fortement une fonctionnalité acoustique et mécanique. Le public est désireux non seulement de voir, mais bien encore d'entendre, et à fortiori le public de musiciens ou de mélomanes. Cet aspect est assez spécifique de ce type de collection, et pose un problème évident : peut-on se permettre de laisser jouer ces instruments patrimoniaux, potentiellement fragiles, sans compromettre à plus ou moins long terme leur rôle de témoins historiques ?

Selon les familles organologiques, les modes de jeu impliquent différents types de « risques » ; ces différentes familles peuvent également présenter des différences en termes de matériaux, de constructions, et de sensibilités aux différents types de contraintes mécaniques et hygrothermiques.

Les instruments à cordes sont un bon cas d'étude, que ce soit en termes de demande du public, ou de risque et de complexité : leur construction est généralement assez fragile, et ils sont soumis en conditions de jeu à des contraintes mécaniques statiques et dynamiques, en plus des contraintes dues aux inévitables variations hygrothermiques dès que l'instrument serait sorti de conditions strictement régulées. En termes de matériau, ces instruments sont dans la très vaste majorité réalisés en bois, matériau très sensible aux variations hygrothermiques.

L'objet global de la présente étude est d'évaluer l'impact de l'application de contraintes mécaniques et hygroscopiques, statiques et dynamiques sur le comportement de bois comparables à ceux des instruments considérés, dont l'âge depuis l'abattage s'étale entre quelques années et quelques siècles. Les propriétés élastiques et viscoélastiques des bois étant d'importance primordiale à la fois pour la tenue mécanique, et le rendu acoustique, des instruments, c'est à l'étude des éventuelles modifications de ces propriétés que nous nous intéresserons dans le cadre de ce projet.

L'étude devrait comprendre des essais viscoélastiques sur des bois datés de l'époque actuelle, jusqu'à 450 ans en arrière, tout d'abord en conditions régulées et sans application de contraintes, puis après application de contraintes mécaniques statiques et dynamiques (vibrations), éventuellement couplées à des variations de conditions hygrothermiques.

## Problématique de la première phase de travail

Pour commencer, il importe de mettre au point et de maîtriser les outils de mesure scientifique des propriétés envisagées. La méthode retenue a été développée par Marc François, du LMT (ENS Cachan). Elle doit permettre de mesurer un paramètre fondamental de la viscosité des matériaux : le déphasage entre une contrainte sinusoïdale appliquée, et la déformation résultante. Idéalement il serait très important de pouvoir obtenir également les propriétés élastiques dans le même essai, nous reviendrons sur ce point ultérieurement.

Quelques avantages potentiels de cette méthode sont les possibilités de travailler : sur une gamme de fréquences dans l'audible continue et assez large ; sur des éprouvettes de bois de dimensions réduites, permettant d'étudier les propriétés du bois dans ses différentes

directions matérielles. Ce dernier point est important car le degré d'anisotropie est un facteur important dans le comportement des plaques vibrantes, et le bois est un matériau très fortement anisotrope mais pour lequel il est souvent difficile d'obtenir en moyennes dimensions du matériel expérimental bien orienté pour les directions transverses. Nous espérons également pouvoir utiliser le dispositif expérimental pour imposer des vibrations répétées aux échantillons de bois afin d'observer l'impact potentiel de ce traitement sur les propriétés étudiées.

Cette première phase de travail avait pour objectif de tester, et si possible valider, l'applicabilité de cette méthode expérimentale au bois, sa reproductibilité, et la possibilité d'extraire des informations sur les propriétés élastiques en même temps que sur les propriétés visqueuses.

### **Organisation matérielle et humaine**

Ce projet associe la Cité de la Musique, institution demandeuse, le Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (CNRS-Université Montpellier II) Equipe Mécanique de l'Arbre et du Bois pour l'expertise sur le matériau bois ; le Laboratoire de Mécanique et Technologie LMT-Cachan pour le dispositif expérimental ; et le Laboratoire d'Acoustique Musicale (CNRS-Université Paris VI) pour le conseil en acoustique. La première étape a consisté en la mise à disposition par le LMGC-Bois d'une doctorante –l'auteur du présent rapport- pour la validation du dispositif de mesure et de son applicabilité au matériau bois. La préparation de l'échantillonnage de bois pour l'étalonnage de la mesure a été réalisée par l'auteur dans son atelier personnel, à partir de stocks identifiés botaniquement au Département Forêts du CIRAD et partiellement caractérisés mécaniquement par l'auteur.

Cette première étape a comporté 2 semaines et demie de séjour à Paris en Juin 2004. Initialement prévu au sein de la Cité de la Musique, le travail s'est finalement effectué au sein du LAM, où se trouvaient à la fois les matériels, et les savoir-faire techniques, nécessaires. La méthode expérimentale étant encore à l'étude, elle ne disposait pas encore d'équipements scientifiques dédiés ; cas de figure normal, mais qui a un peu limité l'accessibilité à ces équipements et donc les plages de travail disponibles.

## **II. Matériel et méthodes**

### **II.a. Matériel**

Les éprouvettes ont pour dimensions : 55\*5\*5mm (L\*R\*T dans le cas des bois).

#### **II.a.1. Références**

Le matériau choisi comme référence pour la mesure du déphasage est un aluminium : Au4G –T4, matériau considéré comme référence non visqueuse dans la communauté des mécaniciens. L'éprouvette de référence initialement disponible était en deux parties (dans la longueur), et de précision d'usinage moyenne. La réelle éprouvette de référence a été usinée à une précision de 0.001mm.

Idéalement il serait utile de disposer d'une autre référence, de déphasage non nul et bien connu. Il était envisagé d'utiliser un PMMA (Polymétacrylate), matériau pour lequel on dispose de bases de données importantes pour les propriétés visqueuses.

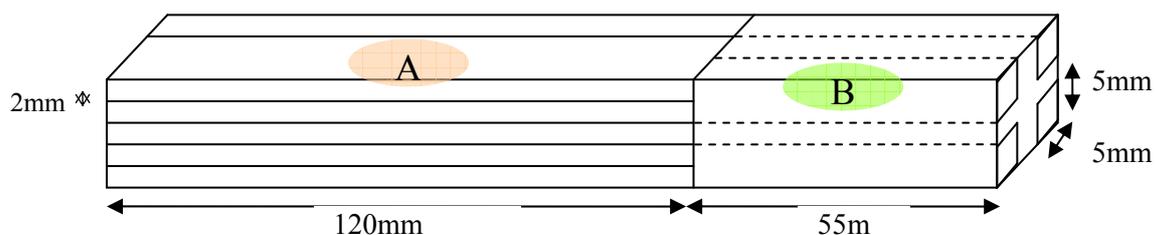
## II.a.2. Echantillonnage de bois pour l'étalonnage

Afin de valider l'applicabilité de la méthode à des bois de comportement contrasté, nous avons choisi un échantillonnage couvrant une grande partie de la gamme des densités (0,23-1,23) et modules d'Young axial (3-33GPa) existant pour « le » matériau bois. Le facteur d'amortissement en direction axiale étant souvent considéré comme une approximation réaliste de la viscoélasticité du bois, nous avons essayé d'obtenir une certaine gamme de variation sur ce paramètre -gamme cependant réduite aux valeurs faibles à moyennement élevées, mais qui correspond aux variations observables sur les principaux bois de facture d'instruments à cordes.

Une série d'éprouvettes a été préparée à partir de matériels pour lesquels avaient déjà été mesurés le module d'Young dynamique, et le facteur d'amortissement, en direction longitudinale. Ces premières mesures avaient été effectuées par vibrations forcées de poutres libre - libre, dans une gamme de fréquences 250-600Hz. Les éprouvettes pour la présente étude ont été prélevées dans du matériel jumelé à celui utilisé pour l'étude précédente (c'est à dire qu'elles proviennent d'un même carrelé de 20\*20mm en section transversale, et immédiatement adjacentes en direction longitudinale). Malgré ce jumelage, il importe de prendre en compte les variations entre différentes éprouvettes (voir tableau ci-dessous), car les dimensions réduites des éprouvettes, pour les deux méthodes, impliquent qu'elles prennent en compte des variations locales de propriétés, en direction radiale et tangentielle.

**Tableau 1 : Désignation, densité, Module d'Young spécifique, Module d'Young, et facteur d'amortissement, en direction Longitudinale, pour les bois utilisés pour l'échantillonnage.** Les Coefficients de variations sont entre 4 éprouvettes jumelées (cov entre mesures sur une même éprouvette <5%)

Essence	Echantillon	Densité (12%)		E/ $\rho$ (Gpa)		E (Gpa)		tan $\delta$	
		moy	cov (%)	moy	cov (%)	moy	cov (%)	moy	cov (%)
Fromager	882	0,23	10	11	6	3	6	12.0.10 <sup>-3</sup>	13
Epicéa	EDI	0,43	0	27	1	11	2	7,5.10 <sup>-3</sup>	2
Peuplier	pg1	0,47	3	34	5	16	7	8,3.10 <sup>-3</sup>	5
Padouk (aubier)	Pa4	0,64	6	15	18	10	19	10,0.10 <sup>-3</sup>	17
Padouk (aubier)	Pa2	0,76	3	16	6	12	8	9,4.10 <sup>-3</sup>	7
Padouk (duramen)	Pna3	0,81	2	17	23	14	22	5,1.10 <sup>-3</sup>	17
Palissandre Madagascar	Dam1	0,88	2	16	4	15	7	4,5.10 <sup>-3</sup>	3
Divida	D1	0,93	8	19	3	18	9	7,0.10 <sup>-3</sup>	5
Satiné	Br2	0,96	1	26	4	25	4	4,8.10 <sup>-3</sup>	5
Satiné	Br1	0,98	2	25	6	24	6	4,9.10 <sup>-3</sup>	7
Macacauba	Plt1	1,04	3	23	13	24	12	5,6.10 <sup>-3</sup>	19
Palissandre Madagascar	Dam2	1,12	0	23	4	26	5	4,5.10 <sup>-3</sup>	6
Corazao de negro	Cn1	1,23	2	27	6	33	6	3,9.10 <sup>-3</sup>	5



**Figure 1 : Débit et jumelage des éprouvettes pour les deux méthodes expérimentales. A= vibrations forcées de poutres libre-libre ; B : méthode à l'étude.**

Pour la suite de l'étude, il est à noter que de nombreux autres stocks de matériel mesurés et jumelés de la même façon sont disponibles.

## II.b. Méthode

### II.b.1. Montage utilisé

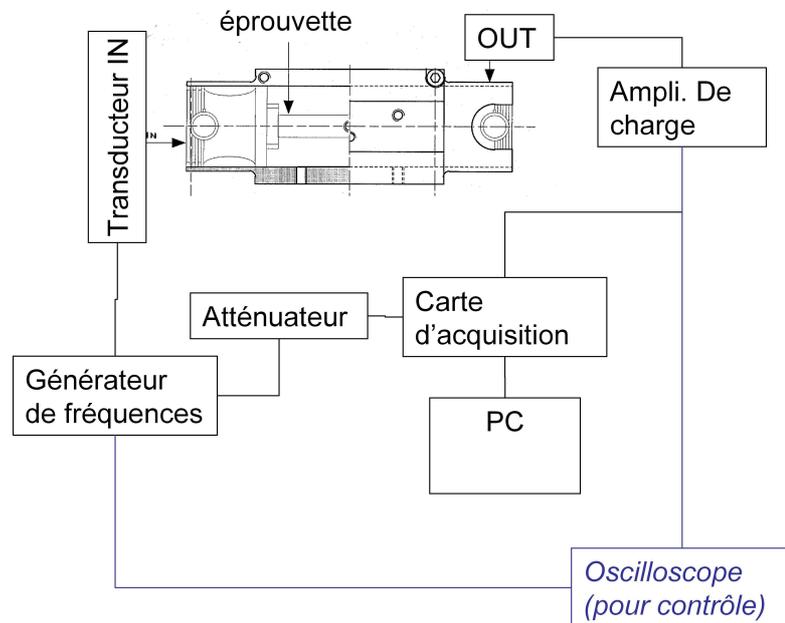


Figure 2 : schéma du montage expérimental

Les capteurs sont des transducteurs ultrasonores utilisés en dehors de leur bande passante habituelle. Ceci implique un faible niveau d'amplitude, et donc la nécessité d'éliminer au maximum tout bruit parasite. Le bâti a été conçu par Marc François dans l'optique d'éliminer toute résonance parasite aux fréquences étudiées. L'éprouvette est serrée entre les transducteurs manuellement (par un serre-joint à excentrique : noter le débattement du levier permet une certaine reproductibilité –relative !- du serrage). Dans cette première phase de travail, l'impulsion a été faite « manuellement », par un balayage rapide de fréquences (« chirp ») à partir d'un générateur de fréquences, dans la gamme 300-3000Hz. Quoique l'acquisition se fasse directement sur PC via une carte d'acquisition audio, un oscilloscope a été inséré dans le montage à fins de contrôle. L'atténuateur a pour fonction de protéger la carte d'acquisition tout en maintenant un niveau d'amplitude d'excitation suffisamment haut.

Compte tenu du faible niveau d'amplitude de signal, il est nécessaire de travailler en chambre sourde pour s'affranchir au maximum des bruits extérieurs parasites; par ailleurs, les propriétés viscoélastiques des bois étant couplées aux variations d'hygrothermie, les mesures doivent être effectuées en atmosphère régulée.

### II.b.2. Sources possibles d'erreurs

Malgré la simplicité théorique de la méthode expérimentale, et l'attention portée à sa conception –notamment au niveau de l'élimination de résonances parasites du bâti dans la gamme de fréquences étudiées (<5KHz), certaines conditions expérimentales sont susceptibles d'induire des mesures erronées :

- Capteurs : Les capteurs utilisés sont des transducteurs ultrasonores : ils comprennent un « backing » amortissant, destiné à atténuer le bruit aux fréquences

ultrasonores. Dans le cas présent où ils sont utilisés en dehors de leur gamme normale de fréquence, ce backing amortissant est fortement susceptible d'introduire une erreur systématique qu'il importera alors de quantifier.

Par ailleurs, la réponse n'est pas linéaire sur la surface du capteur, il importe donc de bien centrer les éprouvettes et d'être aussi précis que possible dans le positionnement. Enfin, le module d'Young des céramiques composant ces capteurs est de l'ordre de 40-50 GPa, ce qui est supérieur aux valeurs rencontrées pour les bois, mais inférieur au module de l'aluminium utilisé comme référence. Cependant, ceci ne devrait pas avoir d'effet, les rapports de longueur éprouvette/pastilles céramiques faisant que celles-ci ont toujours une raideur ( $k=ES/L$ ) très supérieure à celle de l'éprouvette.

- Conditions aux limites capteurs/éprouvettes
  - o Géométrie du contact : il importe que les faces des deux transducteurs soient parfaitement parallèles (ceci est assuré par le bâti), et que les faces des éprouvettes soient parfaitement en contact avec la surface des capteurs. Pour ceci, il faut d'une part un usinage très précis, d'autre part un positionnement précis des éprouvettes.
  - o Serrage : il doit être suffisant pour assurer un bon contact, et devrait idéalement être normalisé.
  - o Couplant : nécessaire pour assurer un bon contact dans le cas de surface non parfaitement lisses (bois), mais il ne doit pas modifier les propriétés du matériau étudié.

### **III. Premiers résultats**

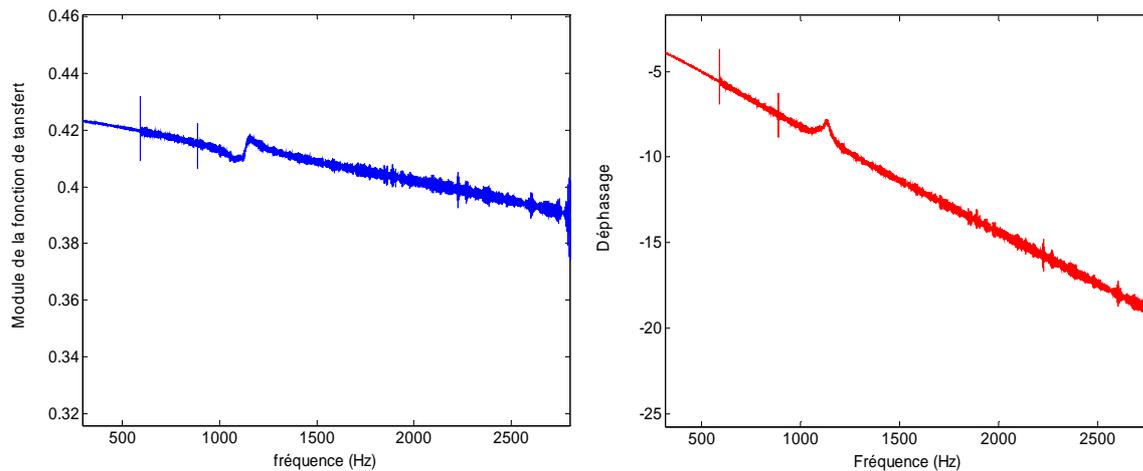
#### ***III.a. Effets des paramètres expérimentaux***

##### **III.a.1. Capteurs**

Comme mentionné ci-dessus, le comportement des capteurs eux-mêmes induit une erreur systématique sur les mesures. Ceci est observable sur la figure 3 : on obtient, pour le module de la fonction de transfert, et à fortiori pour le déphasage, une pente dans la gamme de fréquence étudiée ; par ailleurs le déphasage « initial » (à 300Hz) est non nul. Ces courbes correspondent à l'éprouvette de référence en aluminium Au4G-T4, dont le déphasage doit être nul, et constant sur la gamme de fréquences. Dans cette gamme, l'erreur induite par les capteurs apparaît cependant linéaire. Il est probablement possible de l'éliminer des courbes de déphasage obtenues sur les échantillons (de bois ou matériaux viscoélastiques), simplement en soustrayant de ces courbes celle obtenue sur la référence non visqueuse.

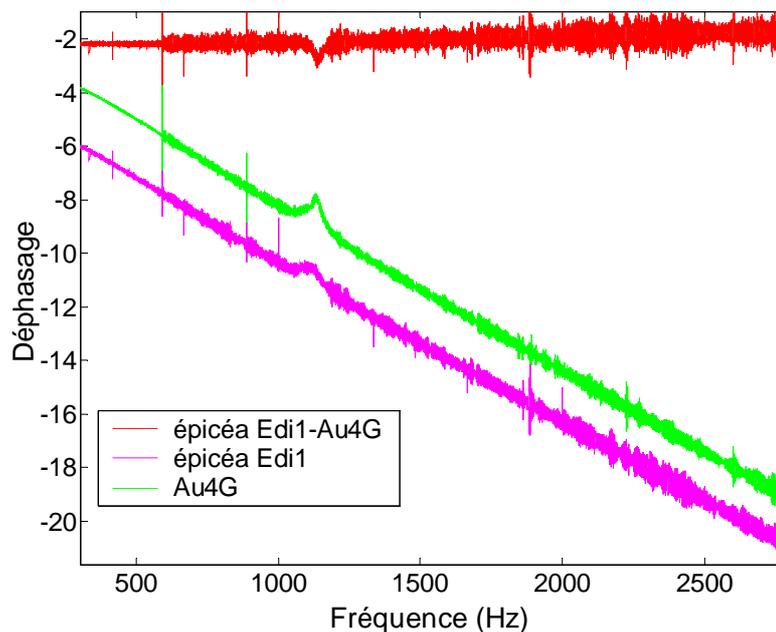
On peut par ailleurs observer un saut dans les courbes, aux environs de 1200Hz, qui se retrouve dans tous nos essais. Le bâti ayant été conçu pour éviter les résonances parasites, l'on peut penser que ce décrochement provient de bruits occasionnés par le balayage en fréquence manuel à partir du générateur de fréquences. Ceci est à vérifier avec une impulsion

automatisée.



**Figure 3 : Module de la fonction de transfert, et déphasage, obtenus pour l'éprouvette de référence en aluminium Au4G-T4, couplée aux transducteurs par du ruban adhésif double - face.**

La figure 4 présente une courbe obtenue par déduction de la courbe de déphasage mesurée pour l'éprouvette de référence en aluminium, par rapport à la mesure sur un bois pouvant être considéré comme « référence » : épicéa de structure régulière et bien orienté selon ses directions d'anisotropie.



**Figure 4 : courbes de déphasage obtenues pour l'éprouvette de référence en aluminium, pour une éprouvette de bois « référence » (épicéa en direction L), et courbe corrigée pour l'épicéa (en rouge) (couplant : adhésif double face).**

On peut constater que l'évolution du déphasage en fonction de la fréquence apparaît linéaire, et montre une faible diminution vers les fréquences plus élevées (artefact ou fait réel ?), mais en tout cas pas de variations très importantes dans cette gamme de fréquences. On peut également remarquer que le fait de soustraire deux courbes déjà bruitées augmente encore le bruit sur la courbe « corrigée ». L'origine du bruit observé n'a pas encore été étudiée : cause physique, ou bien liée au traitement du signal ? Une comparaison des courbes

corrigées obtenues sur les éprouvettes de bois préparées pour l'étalonnage est présentée en § III.c.

### III.a.2. Couplage transducteurs/éprouvette

Ce point s'est avéré le plus problématique que ce soit en terme de serrage des éprouvettes, ou du couplant utilisé. Le couplant visqueux, qui donne de bons résultats pour les matériaux peu poreux (aluminium, bois de forte densité), a l'inconvénient de pénétrer par capillarité dans les bois poreux – tel l'épicéa qui devrait être utilisé dans l'étude du vieillissement (Figure 5), ce qui se traduit par une augmentation du déphasage au cours du temps. Nous avons ensuite essayé de ne pas employer de couplant du tout, mais alors le module de la fonction de transfert était peu répétable, dépendant trop de l'état de surface et du serrage de l'éprouvette. Enfin, il semblerait que l'utilisation d'adhésif double-face permette de s'affranchir partiellement de ces problèmes. La validité de ce moyen reste à affiner.

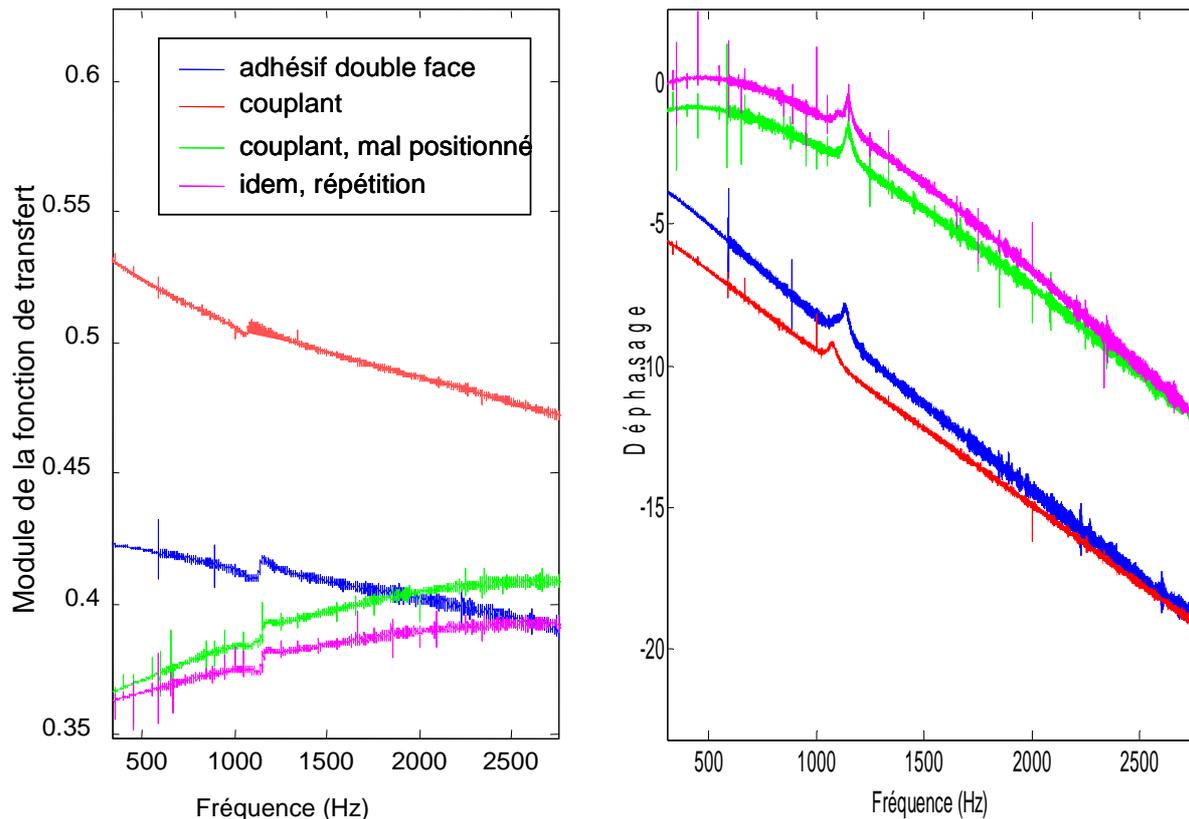
Le problème de géométrie du contact peut être limité en apportant un grand soin à l'usinage des éprouvettes et à leur positionnement. Cependant, il serait utile de déterminer un dispositif permettant de normaliser le positionnement d'une part, et le serrage d'autre part. Ce dernier point ne pose pas trop de problèmes sur des bois à module d'Young moyens à forts, par contre sur des bois à faible module (fromager, épicéa orienté presque radialement), un serrage comparable à celui appliqué sur l'ensemble des éprouvettes peut provoquer la ruine de l'éprouvette (Figure 5 en bas).



**Figure 5 : haut : pénétration du couplant dans une éprouvette d'épicéa en direction longitudinale ;  
bas : rupture d'une éprouvette d'épicéa en direction quasi radiale, pour un serrage comparable à celui  
appliqué sur les éprouvettes longitudinales**

### III.b. Répétabilité

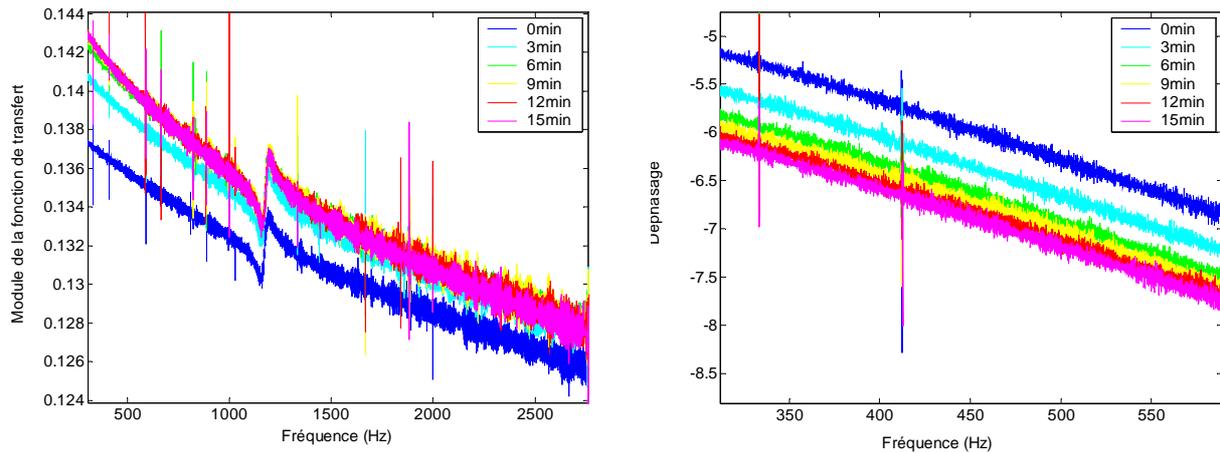
Dans cette première phase de travail, les problèmes de couplage capteurs-éprouvettes se sont avérés générer trop d'erreurs pour que l'on puisse réellement quantifier une « répétabilité » entre différents montages éprouvette-capteur. Pour exemple, la figure 6 montre les courbes obtenues sur l'éprouvette de référence aluminium, entre différentes conditions expérimentales : deux montages paraissant satisfaisants, l'un avec couplant visqueux, l'autre avec adhésif double face, et deux acquisitions successives pour un montage avec couplant visqueux où l'éprouvette était mal positionnée. Il est à noter que les deux courbes « normales » (couplant visqueux et adhésif double-face) ne peuvent pour le moment pas être considérées *strictu sensu* comme des références de ces conditions expérimentales, le nombre d'essais réalisés n'étant pas suffisant dans chaque cas pour s'assurer d'une validité statistique des différences observées ici.



**Figure 6 :** module de la fonction de transfert, et déphasage, obtenus sur l'éprouvette de référence en aluminium, dans différentes conditions de couplage (rouge : couplant visqueux, bleu : adhésif double face, vert puis rose : couplant visqueux, éprouvette mal positionnée susceptible de glisser sur la surface des capteurs). Les courbes bleues et rouges correspondent à des essais individuels et non à des moyennes par condition.

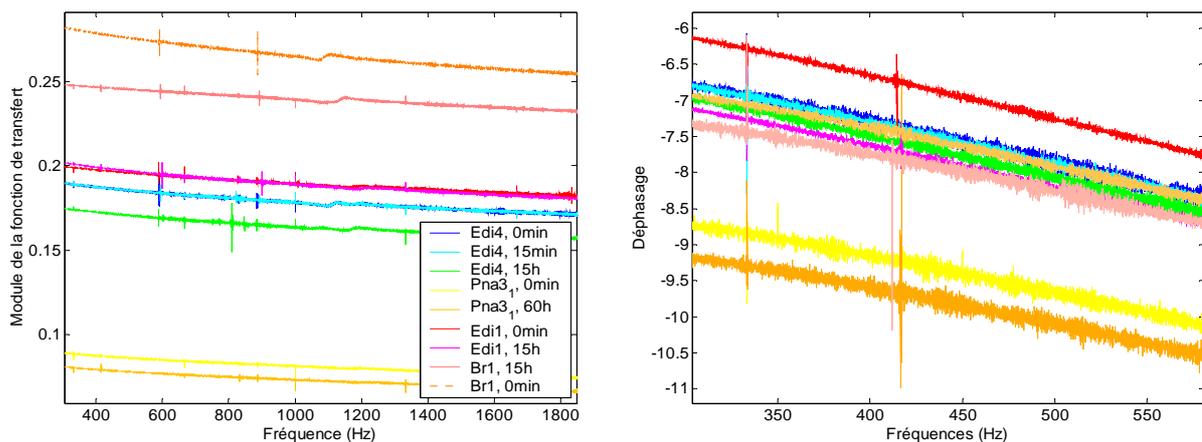
Comme il a été remarqué plus haut, l'une des principales causes de variations entre différents montages d'une même éprouvette proviennent d'un mauvais positionnement sur la surface des transducteurs, dont la réponse n'est pas linéaire sur la surface. L'utilisation d'adhésif double-face fin permet de mieux s'assurer que l'éprouvette reste bien positionnée lors du serrage. Dans cette condition de couplage, il devrait être possible de quantifier la répétabilité sur des éprouvettes de référence : aluminium, et épicea. Les premiers essais dans cette condition laissent espérer une répétabilité acceptable.

Dans des conditions expérimentales fixées, les acquisitions successives sans démontage de l'éprouvette montrent par contre peu de variations. Les cas où les courbes obtenues lors d'acquisitions successives sur un même montage présentent une dérive sont généralement dus aux problèmes de contact et de couplant évoqués ci-dessus. Il a été observé une augmentation quasiment linéaire du déphasage en fonction du temps (sur 30minutes) lorsque le couplant visqueux pénètre dans un bois poreux. Un autre exemple flagrant a été observé en essayant d'éviter cette pénétration du couplant en collant de l'adhésif simple sur les faces de l'éprouvette, et en utilisant le couplant visqueux : l'éprouvette a alors glissé sur la surface du capteur, et on observe dans les premières minutes une nette augmentation du module de la fonction de transfert, et du déphasage (figure 7), qui semblent se stabiliser ensuite.



**Figure 7 : Dérive observée lorsque l'éprouvette glisse sur la surface du capteur (acquisitions successives sur un montage avec couplant visqueux, et faces de l'éprouvettes « scellées » par de l'adhésif simple)**

Une autre dérive dans le temps a pu être observée : lorsqu'une éprouvette était laissée montée, serrée dans le bâti mais sans excitations –générateur éteint, en fin de journée, et remesurée pour ce même montage après une nuit ou un week-end, on observe une diminution du module de la fonction de transfert, et une augmentation du déphasage (Figure 8). Effet « matériau » (fluage ?) ou effet « montage/géométrie du contact » ? En tout cas, ce point

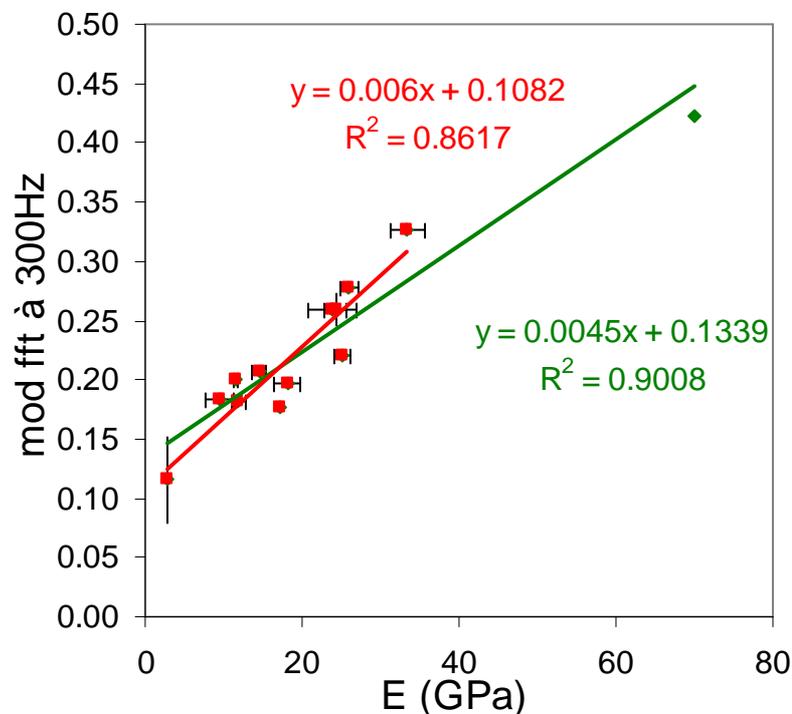


**Figure 8 : Mesures obtenues, sur différentes éprouvettes, pour un même montage : initialement, et après au moins une nuit où l'éprouvette est restée montée, serrée dans le bâti.**

risque d'être problématique pour la suite de l'étude (application de vibrations répétées et observation de leurs effets potentiels sur les propriétés viscoélastiques des bois), et devra préalablement être élucidé. Des essais sur les mêmes gammes de temps (mesures initiale puis après >12h) sur l'éprouvette d'Au4g-T4 non visqueuse permettraient de vérifier les causes « montage » et « couplant », en éliminant la possibilité de fluage du matériau.

### III.c. Etalonnage pour le module d'Young et valeurs de déphasage, sur différents bois

Vérifier la possibilité d'obtenir, en même temps que le déphasage, une mesure du module d'Young des bois étudiés était un des objectifs de cette première phase de travail. Dans un premier temps, les variations entre mesures dues aux problèmes rencontrés au niveau des paramètres expérimentaux ne permettaient pas d'obtenir, au cas par cas, de relation acceptable entre le module de la fonction de transfert et le module d'Young. Cependant, si l'on met en relation ces deux paramètres, pour les mesures obtenues sur l'échantillonnage de bois présenté en § II.A.2, et utilisant l'adhésif double-face comme couplant, on obtient une corrélation (figure 9) qui laisse espérer qu'en minimisant les erreurs et variations de mesures, l'on pourra effectivement extraire des valeurs de module d'Young en même temps que de déphasage. Si l'on inclut dans cet échantillonnage l'éprouvette « de référence » en aluminium Au4G-T4, on obtient un décalage de la droite de corrélation (en vert) ; cependant, ceci est à vérifier sur un plus grand nombre d'essais.



**Figure 9 : relation entre module de la fonction de transfert (à 300Hz), et module d'Young mesuré par vibrations de poutre libre-libre, pour l'échantillonnage de bois présenté au §II (en rouge), et en incluant l'éprouvette « de référence » en aluminium (en vert). Les barres d'erreurs en X correspondent aux variations locales de propriétés moyennes entre 4 éprouvettes d'un même stock jumelé, en Y aux variations entre acquisitions sur une seule éprouvette du même stock (cf. § II.A.2 et figure 1).**

En ce qui concerne les mesures de déphasage, la figure 10 présente une comparaison des courbes corrigées (en soustrayant la courbe de déphasage de l'éprouvette d'aluminium Au4G-T4) obtenues sur les mêmes bois que pour l'étalonnage de la mesure de module ci-dessus. On doit tout d'abord noter à nouveau deux artefacts : le « saut » aux environs de 1200Hz déjà signalé, et le très fort niveau de bruit. Le niveau de bruit est « acceptable » (= suffisamment bas pour distinguer les courbes des différents échantillons) dans la gamme 300-580Hz, et augmente ensuite brutalement, ce qui pourrait laisser penser que cela est dû au balayage en fréquences manuel à partir du générateur de fréquences, mais il peut également y avoir d'autres causes à ce bruit. Si l'on s'en tient à la partie « propre » de ces courbes, le

déphasage paraît linéaire et constant dans cette gamme réduite de fréquences. Il est difficile d'extrapoler sur l'évolution du déphasage aux plus hautes fréquences compte tenu de la faible qualité actuelle du signal au-delà de 580-600Hz.

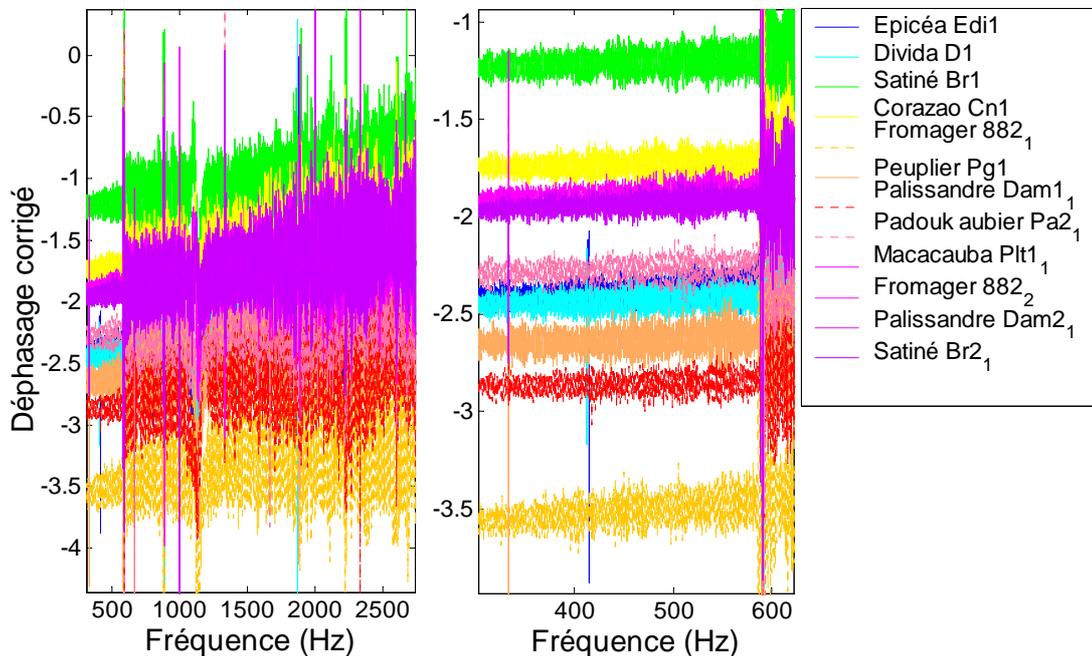


Figure 10 : courbes de déphasage corrigées (par le déphasage obtenu sur l'éprouvette de référence en aluminium), obtenues sur l'échantillonnage de bois présenté en § II.A.2. , avec comme couplant l'adhésif double face fin; à gauche : sur toute la gamme de fréquence étudiée ; à droite : sur la gamme de fréquences moins bruitée.

Comme nous l'avons mentionné plus haut, le facteur d'amortissement est souvent considéré comme une approximation réaliste de la viscoélasticité dans le cas des bois. Nous avons donc observé l'éventuelle relation entre les valeurs de déphasage obtenues à 300Hz, et les facteurs d'amortissements qui avaient été mesurés pour ces mêmes bois dans une gamme de fréquence proche (250-500Hz). On peut observer sur la figure 11 qu'une corrélation semble se dessiner, ces deux paramètres évoluant bien dans le même sens, mais les erreurs encore fortes sur les mesures de déphasage, cumulées aux variations locales de propriétés entre éprouvettes, ne permettent pas pour l'instant de conclusion quand aux relations entre ces deux paramètres, qui devront de plus être étudiées de façon théorique.

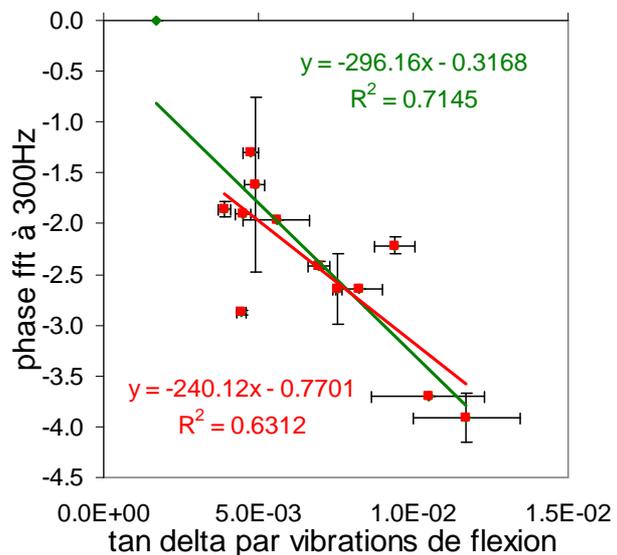


Figure 11 Relation entre déphasage (à 300Hz), et facteur d'amortissement mesuré par vibrations de poutre libre-libre, pour l'échantillonnage de bois présenté au §II (en rouge), et en incluant l'éprouvette « de référence » en aluminium (en vert, données de facteur d'amortissement : logiciel CES Selector).  
Barres d'erreurs : voir figure 9.

## IV. Conclusion provisoire et perspectives

Cette première phase de travail a permis de mettre en évidence plusieurs facteurs d'erreurs au niveau des paramètres expérimentaux, et de commencer à proposer des solutions pour améliorer la précision et la répétabilité des mesures.

Le problème du contact entre éprouvettes et transducteur est primordial. L'utilisation comme couplant d'adhésif double-face de faible épaisseur permet apparemment d'éviter de modifier les propriétés du matériau, et aussi de limiter les risques de mauvais positionnement de l'éprouvette sur la surface des transducteurs (que ce soit au positionnement initial, ou lors du serrage dans le bâti). Mais des imprécisions tant au niveau du serrage que du positionnement des éprouvettes persistent, et il serait utile de concevoir un dispositif permettant de normaliser ces paramètres.

Par ailleurs il semblerait qu'il existe une dérive des mesures –sans application aucune de vibrations- pour des temps assez longs (>12h), et l'origine de cette dérive devra être élucidée et si possible éliminée afin de s'assurer de la validité des essais sous vibrations répétées qui sont prévus pour la suite de l'étude.

Une autre source d'imprécision semble être due au balayage en fréquence manuel à partir d'un générateur, qui semble induire de forts niveaux de bruits dans la gamme de fréquence étudiée. L'origine de ces bruits devrait être vérifiée –et si oui éliminée- lors de la prochaine phase de travail, pour laquelle l'impulsion devrait être commandée par l'ordinateur. Mais il est également possible que le bruit apparent soit lié au traitement du signal.

Enfin, il semblerait que l'un des objectifs de cette première phase de travail soit presque atteint : une bonne relation apparaît entre module de la fonction de transfert, et module d'Young, même si pour le moment les imprécisions citées ci-dessus ne permettent pas de remonter au module d'Young à partir de la mesure de façon satisfaisante pour une acquisition donnée. Les améliorations proposées ci-dessus devraient permettre de gagner suffisamment en précision et répétabilité pour que l'on atteigne cet objectif.

## V. Annexe

**CD des fichiers d'essais sous Matlab, comprenant le listing des fichiers d'essais, avec conditions expérimentales, valeurs initiales relevées, et observations (« Listing fichiers Matlab et conditions expérimentales.xls »)**