

## **Caractérisation mécanique des bois et facture : origines et recensement de la variabilité**

**Iris Brémaud**, chercheur post-doctorant, Graduate School of Agriculture, Université préfectorale de Kyoto, Japon

*Plusieurs catégories de propriétés des bois entrent en compte dans leur choix en facture, puis participent aux spécificités des instruments finis : propriétés physiques, visuelles, d'usinage, mécaniques, acoustiques... Nous présentons une brève synthèse de recherches internationales sur les propriétés mécaniques des bois en lien avec leur emploi en facture et leur comportement vibratoire. L'accent est porté sur les travaux de chercheurs japonais menés depuis les années 1970 sur les propriétés vibratoires viscoélastiques. Les thèmes abordés comprennent : caractérisations de bois sélectionnés par des facteurs ; facteurs microstructuraux et chimiques déterminant ces propriétés et leurs variations entre espèces ou dans une espèce. Ces informations de la littérature sont complétées par nos travaux concernant les bois tropicaux et l'influence des composés extractibles du bois de cœur sur l'amortissement des vibrations. Afin de regrouper les informations éparses, nous avons créé une base de données dédiée aux bois de facture et à leurs propriétés. Cette base comprend environ 600 espèces ligneuses, employées en facture d'instruments de différentes aires géoculturelles et/ou dont les propriétés vibratoires sont caractérisées.*

## **Mechanical characterization of woods and instruments making : origins and compilation of variability**

*Several categories of wood properties are taken into account for their selection in instrument making: physical, visual, workability, mechanical, acoustical.... They then participate to the specificities of finished instruments. We present here a brief synthesis of international researches on the mechanical properties of wood in relation to their use in instrument making and their vibrational behaviour. It focuses on works run by Japanese researchers since the 1970's about viscoelastic vibrational properties. These address such thematic as: characterization of woods selected by makers; microstructural and chemical factors affecting these properties and their variations between or within species. Literature information is completed with our works about tropical woods and the influence of heartwood extractive compounds on vibration damping. In order to gather rare and scattered information, we created a database dedicated to instrument making woods and their properties. This base covers about 600 woody species, used in making instruments of different geo-cultural areas and/or for which vibrational properties have been characterized.*

## I Introduction

Les bois participent à différents niveaux aux spécificités des instruments fabriqués de ces matériaux. Différents critères de choix peuvent entrer en compte lors de la sélection de matière première : physiques tels que densité, mécaniques, acoustiques... Mais aussi bien sûr des critères visuels, de disponibilité, des critères culturels... Si l'on adopte une vue assez large, de nombreux types de bois sont employés, pour différentes parties d'instruments, des différentes familles organologiques, et appartenant à des aires géoculturelles différentes.

Cette variabilité des usages peut être mise en regard de la biodiversité des bois existants : plusieurs dizaines de milliers d'espèces à travers le monde. Comment appréhender et mettre en relation ces variabilités d'usages et de bois ? En termes de propriétés des bois, il est utile de considérer d'abord un jeu élémentaire de paramètres qui soient importants. Ici on considérera les propriétés « acoustiques », en prenant en compte l'amortissement qui traduit la viscoélasticité du bois et a une forte influence sur le rendu acoustique et le module d'Young. Parmi toutes les espèces existantes, quelle peut être la variabilité de ces propriétés vibratoires viscoélastiques ? Quelles sont leurs causes de variabilité ? Cet article présente une revue sur ces aspects, complétée par nos propres travaux sur la relation entre composition chimique du bois de cœur et propriétés vibratoires.

Après cette approche des causes de la variabilité des propriétés vibratoires des bois, je présente une base de données créée spécifiquement pour recenser et mettre en relation les usages de bois en instruments, et les données actuellement connues sur la caractérisation mécanique vibratoire de différentes espèces (et éventuellement qualités) de bois.

## II Propriétés vibratoires viscoélastiques : définitions et facteurs de variation

### II.1 Définitions de base et critères combinés

Un jeu élémentaire de propriétés à prendre en compte pour ce qui concerne le comportement vibratoire des bois comprend (au minimum) la densité (souvent notée  $\rho$ ), le module d'élasticité (ou module d'Young) dynamique  $E'$  et le module d'élasticité spécifique  $E'/\rho$ , ainsi que le facteur de perte (ou coefficient d'amortissement) souvent noté  $\tan\delta$ . A titre de rappel, la vitesse de propagation du son dans une pièce de bois est proportionnelle à la racine carrée de  $(E'/\rho)$  ; de même pour les fréquences de résonance d'une pièce de bois (en prenant en compte sa géométrie évidemment). Les propriétés d'amortissement peuvent être exprimées par différents paramètres dans la littérature, selon l'objectif initial de chaque étude et la méthode de mesure employée. Ces paramètres comprennent :  $\tan\delta$  = tangente de l'angle de perte ou coefficient d'amortissement (ou  $\eta$  = coefficient de perte ou de viscosité) ;  $\lambda$  (ou  $\delta_{\log}$ ) = décrément logarithmique (Figure 1a) ;  $Q$  = facteur de qualité (Figure 1b) ;  $\alpha$  = amortissement temporel. Les relations entre ces paramètres sont résumées ci-dessous (eq 1).

$$\tan \delta \cong \eta \cong \frac{\lambda \text{ (ou } \delta_{\log})}{\pi} \cong Q^{-1} \cong \frac{\alpha}{\pi f} \quad (1)$$

Si  $\tan\delta \ll 1$  (pour le bois en direction longitudinale l'ordre de grandeur est  $10^{-3}$ ).  $f$  est la fréquence de mesure.

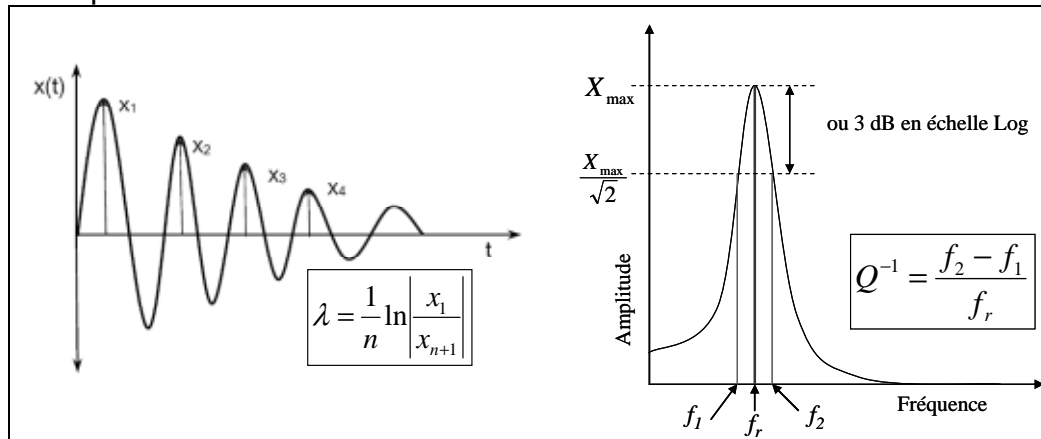


Figure 1 : Expressions du facteur de perte : dans le domaine temporel (à gauche) via le décroissement logarithmique  $\lambda$  ; dans le domaine fréquentiel (à droite) via la largeur de pic à demi-puissance (facteur de qualité  $Q$ ).

Ces 3 propriétés « élémentaires » ( $\rho$ ,  $E'$ ,  $\tan\delta$ ) sont combinées dans différents critères qui ont été proposés pour la caractérisation et/ou la sélection de bois [Barlow 1997 ; Wegst 2006] en lien avec la facture instrumentale. On peut citer notamment :

- « l'efficacité de conversion acoustique »  $ACE = \sqrt{E'_L / \rho^3} / \tan \delta_L$  [Aizawa et al 1998 ; Obataya et al 2000 ; Yano et al 1992 ]
- « l'efficacité relative de conversion acoustique » " $\alpha$ " =  $\sqrt{E'_L / \rho} / \tan \delta_L$  [Obataya et al 2000] ; appelée « paramètre de transmission »  $cQ$  par [Yoshikawa 2007]
- « le ratio de radiation »  $c / \rho = \sqrt{E'_L / \rho^3}$  fréquemment employé.
- Le « paramètre anti-vibration », l'inverse du précédent,  $\rho/c$  [Yoshikawa 2007]

Pour avoir une description plus complète, il faudrait idéalement prendre en compte également l'anisotropie (différence des  $E'/\rho$  et  $\tan\delta$  entre les directions axiales, radiales et tangentielles du bois ; modules et facteurs de perte en cisaillement) [Barlow 1997 ; Aizawa et al 1998 ; Obataya et al 2000]. De plus, il serait souhaitable de disposer de façon systématique des dépendances de ces paramètres aux fréquences, et aux teneurs en eau. Ceci est très loin d'être le cas pour la plupart des espèces et des qualités de bois à l'intérieur d'une espèce. Compte tenu du manque de données à l'heure actuelle, nous aborderons peu ces aspects dans ce texte qui vise les variations intra et inter-spécifiques.

## **II.2 Causes de variations : facteurs microstructuraux et chimiques**

Le bois est un matériau multi-échelles : son comportement global résulte des contributions combinées de facteurs de variations aux différentes échelles. Des aspects importants vis-à-vis des propriétés vibratoires sont introduits ci-dessous.

### **II.2.1 Composition chimique primaire : polymères constitutifs**

Le bois est composé de 3 polymères : la cellulose, qui forme des microfibrilles cristallines très rigides et peu accessibles à l'eau ; la lignine, un polymère réticulé de fort poids moléculaire et de structure très variable; les hémicelluloses, des polymères ramifiés composés de sucres. Les microfibrilles forment des « fibres de renfort » (module d'Young  $\approx 130\text{GPa}$ ) entourées d'une « matrice » (module d'Young  $\approx 4\text{GPa}$  ;  $\tan\delta \approx 0,025$  d'après [Obataya et al 2000]) composée de lignines, d'hémicelluloses, et de la cellulose non cristalline. La rigidité du bois en direction axiale reflète surtout le renfort des microfibrilles, tandis que la viscoélasticité est due à la « matrice » d'hémicelluloses et lignines.

Les variations possibles à ce niveau comprennent notamment : proportion des différents polymères (elle varie selon les bois résineux, feuillus tempérés ou tropicaux) ; différences dans le taux de cristallinité de la cellulose (types de bois, conditions de croissance) ; différences de composition des hémicelluloses et lignines (elles varient entre résineux et feuillus, ainsi qu'entre types de bois notamment dans le cas des bois de réaction). Dans les conditions hygrothermiques « ambiantes » et aux fréquences audibles, la viscoélasticité du bois reflète surtout le comportement de « la » lignine. Des essais dynamiques en fonction des températures et fréquences indiquent par ailleurs que la viscosité de la lignine dépend de sa composition en monomères (ratios des unités S/G) qui détermine la densité des réseaux de liaisons –donc la flexibilité des molécules (pour une synthèse en français voir [Placet 2006]). Cet aspect n'a pas encore été étudié de façon systématique pour les fréquences acoustiques et conditions « ambiantes », mais on peut supposer qu'il joue un rôle non négligeable sur les différences entre types de bois (notamment bois de réaction) et catégories d'espèces.

### **II.2.2 Angle de microfibrilles**

Le bois est composé en grande majorité de fibres, ou trachéides chez les résineux (Figure 2a) ; ce sont des cellules en forme de « tubes » allongés dans la direction axiale de l'arbre. De façon schématique, le bois est composé de la matière des parois de ces fibres, et de « vides ». Il apparaît alors logique que les propriétés de ces parois déterminent les propriétés du bois « macroscopique ». Les parois sont composées des trois polymères introduits ci-dessus, c'est-à-dire de microfibrilles très rigides orientées, dans une matrice bien plus molle et viscoélastique (Figure 2b). La figure 2b présente l'organisation typique de cette matière dans la paroi d'une cellule de type fibre : on voit plusieurs couches successives, avec différentes orientations des microfibrilles. La plupart du volume de la paroi est occupé par la sous-couche S2 : dans cette couche, les microfibrilles de cellulose forment un angle assez faible avec l'axe de la cellule et du tronc. L'angle dans cette couche est souvent appelé de façon générale l'angle des microfibrilles, abrégé comme AMF.

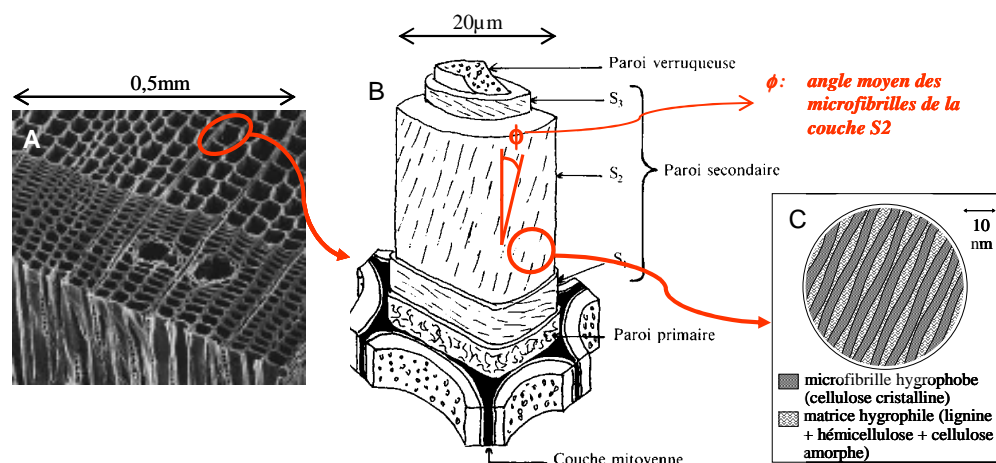


Figure 2 : A : structure cellulaire d'un résineux ; B : organisation de la paroi cellulaire d'une fibre ou trachéide ; C : représentation schématique simplifiée de la matière ligneuse.

Cet AMF est le principal déterminant des variations de propriétés mécaniques des parois : on imagine bien que, selon l'orientation des fibres de renfort très rigides dans une matrice « molle », la matière des parois sera très rigide en direction axiale lorsque les microfibrilles forment un angle faible, et de plus en plus « molle » lorsque cet angle deviendra grand. Les variations d'angle de microfibrilles reflètent notamment les conditions de croissance rencontrées par l'arbre.

Ono [Ono et Norimoto 1983] a mesuré l'effet de l'AMF sur les propriétés vibratoires :

- le module d'élasticité spécifique est représentatif des propriétés des parois puisque la densité représente le rapport entre matière et vide
- le coefficient d'amortissement sur un millier d'échantillons de bois provenant d'une vingtaine d'espèces de résineux.

Leurs résultats sont résumés sur la figure 3.

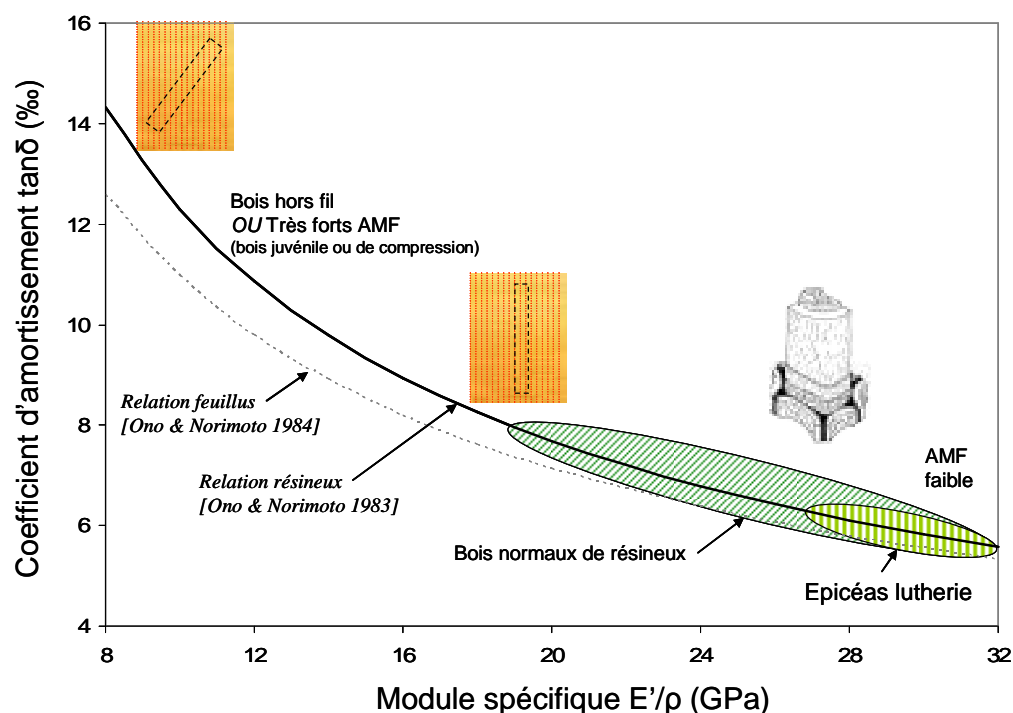


Figure 3 : Relations standards entre le coefficient d'amortissement  $\tan\delta$  et le module spécifique  $E'/\rho$ , d'après [Ono et Norimoto 1983 et 1984]. Les plus fortes valeurs de  $E'/\rho$  correspondent à des bois de droit fil et à faibles angles de microfibrilles (Epicéas de lutherie par exemple) ; les valeurs de module diminuent, et celles d'amortissement augmentent, lorsque les AMF augmentent, puis lorsque le bois est taillé en dehors du fil.

Sur ce très grand nombre d'échantillons de résineux, Ono [Ono et Norimoto 1983] trouvait une très forte relation de forme puissance entre l'amortissement et le module spécifique. Ono [Ono et Norimoto 1984] a ensuite comparé les bois de 30 espèces de feuillus : ils retrouvaient une relation comparable, mais avec des amortissements un peu plus faibles en moyenne et plus de dispersion par rapport à la tendance moyenne. Cet auteurs a aussi étendu la gamme de propriétés en préparant des pièces du bois à différents angles par rapport au fil, et ces résultats « hors du fil » étaient bien dans la continuité de la relation sur bois de droit fil. Les bois sélectionnés comme étant de bonne qualité pour des tables d'harmonie de piano présentaient les plus fortes valeurs de module spécifique, et les plus faibles valeurs d'amortissement. Les auteurs interprétaient la forte relation entre l'amortissement et le module spécifique comme résultant de l'influence de l'angle des microfibrilles sur l'un et l'autre de ces paramètres, et cet effet était « prolongé » par celui des différents angles de fil. Norimoto [Norimoto et al 1986] a ensuite analysé cet effet par un modèle mécanique prenant en compte les angles de microfibrilles, et concluaient que l'AMF est le premier facteur de variation des propriétés vibratoires. Obataya [Obataya et al 2000] a approfondi l'analyse par un modèle basé sur les variations d'AMF, en discutant également les effets sur les rapports d'anisotropie. En résumé, plus l'AMF augmente, plus l'amortissement augmente (et le module spécifique diminue) en direction longitudinale ; en direction transverse, c'est le contraire.

Par ailleurs, on ne doit pas oublier que le bois est un matériau à plusieurs échelles : l'agencement et les dimensions des cellules jouent aussi un rôle. On pourra trouver dans Gachet [Gachet et Guitard 2006] une analyse en français des influences cumulées des orientations dans les parois, et de l'agencement cellulaire.

### ***II.2.3 Remarque sur les largeurs de cernes et leurs corrélations à d'autres paramètres***

Kubojima [Kubojima et al 1997] a mesuré les propriétés vibratoires, la densité, les AMF et l'indice de cristallinité sur du bois adulte d'Epicéa (*Picea abies* Karst) d'arbres de 80 ans ayant eu différentes vitesses de croissance se traduisant par des largeurs de cernes (LdC) de 0,6 à 8,0mm. Il ressort de leurs résultats que l'augmentation des largeurs de cernes se traduit par une diminution de la densité (forte), du module d'Young (forte), du module spécifique (moyenne), une augmentation peu sensible de l'amortissement. D'un point de vue microstructural, l'augmentation des LdC est fortement liée à une diminution de l'indice de cristallinité et à une augmentation de l'AMF. Ces auteurs retrouvent la même évolution à l'intérieur d'un cerne annuel, entre bois initial (« de printemps ») et bois final (« d'été »). L'amortissement était bien moins corrélé aux facteurs microstructuraux que le module spécifique, dans cette gamme de variation (AMF de 5-17%).

Hori [Hori et al 2002] a étudié les paramètres ci-dessus, la taille des cristallites de cellulose, et les rapports entre bois initial (« de printemps ») et bois final (« d'été »), sur des échantillons de différentes espèces de résineux avec des largeurs de cernes de 0,3 à 4,2mm. Leurs résultats suggèrent que l'AMF du bois final reste dans une gamme de valeurs faibles et que c'est surtout l'AMF du bois initial qui varie. Leurs analyses par corrélations multiples indiquent que le premier facteur influençant (négativement) le module spécifique est l'AMF du bois initial. Pour l'amortissement, le principal facteur était la taille des cristallites (relation négative).

Ces deux études montrent que la relation entre largeurs de cernes et propriétés acoustiques relève en fait de facteurs microstructuraux à une échelle inférieure. L'effet propre « largeur de cernes » et texture serait alors surtout sensible sur la densité et l'homogénéité du bois.

### ***II.3 Un facteur de variation supplémentaire : les extractibles***

On a vu que les variations des propriétés vibratoires (module spécifique et amortissement visqueux) relevaient principalement de l'angle des microfibrilles de cellulose dans les parois cellulaires, plus éventuellement des différences dans la composition polymérique de la « matrice ». De plus l'amortissement et le module spécifique sont liés par une relation bien établie dans le cas de bois « modèles » tel l'Epicéa. En fait, plusieurs des bois importants en facture instrumentale, et particulièrement les feuillus tropicaux, ne suivent pas cette relation (Figure 6) et peuvent avoir des amortissements beaucoup plus faibles que des bois « standards », ce qui contribue vraisemblablement à l'intérêt de ces bois pour plusieurs parties d'instruments.

Pour quelques espèces, ces amortissements extrêmement faibles ont pu être attribués à la présence de composés secondaires, de petite taille, appelés extractibles. Ils sont principalement déposés dans le bois de cœur.

Quels sont les niveaux de variabilités en termes d'extractibles ? Parmi les essences « tempérées », les résineux contiendraient en moyenne un peu plus d'extraits (« résines » surtout) que les feuillus (jusqu'à 5-10% environ), quoique ceci soit très variable. Les bois tropicaux sont susceptibles de contenir beaucoup plus d'extractibles : 7% en moyenne et jusqu'à environs 30% de la masse du bois. Les quantités d'extraits varient aussi en fonction des conditions de croissance, entre arbres, et à l'intérieur de l'arbre. Il est bien connu que les extraits sont surtout déposés dans le bois de cœur (lui procurant couleur, durabilité biologique, odeurs, etc.), mais des quantités non négligeables peuvent être présentes dans les aubiers, généralement avec des caractéristiques chimiques et de localisation cellulaire différentes de celles du bois de cœur. Surtout, la composition chimique des extraits est très variable selon les espèces, et constitue d'ailleurs un marqueur taxonomique (cf. la chemotaxonomie, qui relie classification des espèces et types de métabolites secondaires).

### **II.3.1 Les études « pionnières » dans la littérature**

Les premières études significatives concernant l'influence de ces extraits sur l'amortissement des vibrations datent d'une quinzaine d'années, et de nombreuses questions restent à résoudre. [Yano 1994] trouvait que l'amortissement très faible du Red Cedar (*Thuja plicata*) par rapport à l'épicéa était dû aux composés présents dans son bois de cœur coloré : à module spécifique égal, le  $\tan\delta$  du Red cedar est de l'ordre de 5‰, celui de l'épicéa de 7‰. L'amortissement de l'aubier était, lui plus élevé que la moyenne. Après extraction, le  $\tan\delta$  du duramen augmentait de 30%, celui de l'aubier diminuait de 20%, et les deux types de bois redevaient comparables aux « bois normaux ». Le même auteur Yano [Yano et al 1995] a aussi trouvé que les extractibles rendaient les Palissandres de Rio et Indien (*Dalbergia nigra* et *D. latifolia*) moins amortissants que d'autres bois, et que cet effet était beaucoup plus marqué sur le Palissandre de Rio. Sur ce bois, jusqu'à 30% d'extraits au méthanol pouvaient être retirés, provoquant une augmentation de l'amortissement allant jusqu'à plus de 100%, autant en direction longitudinale que radiale. Les extraits semblaient aussi jouer un rôle de renforcement du module spécifique en direction radiale (pas longitudinale).

Enfin, l'étude la plus complète sur le rôle des extraits concernait le Pernambouc (*Caesalpinia echinata*) des archets de violons. Sugiyam et Matsunaga [Sugiyama et al 1994 ; Matsunaga et al 1996] relevaient que le bois de Pernambouc se distinguait parmi de nombreux feuillus, y compris des bois tropicaux de densité comparable envisagés comme essences alternatives, par son coefficient d'amortissement exceptionnellement faible. L'amortissement de ce bois était aussi lié à sa couleur plus ou moins « rouge », et il était augmenté jusqu'à 120% après extraction dans l'eau. Afin de vérifier que l'effet venait bien des extractibles, ces auteurs ont ensuite imprégné du bois d'épicéa avec les extraits retirés, ou bien des molécules isolées proches des extraits du Pernambouc [Minato et al 1997 ; Matsunaga et al 1999]. Ces traitements permettaient de diminuer fortement l'amortissement du bois d'épicéa traité, même pour d'assez faibles pourcentages de gain de masse. Enfin, Matsunaga et Obataya [Matsunaga et al 2000 ; Obataya et al 2001] ont étudié les effets combinés des extraits injectés dans l'épicéa, et des teneurs en eau et fréquences : ils trouvaient que les extraits diminuent très fortement l'amortissement pour des



teneurs en eau faibles ou moyennes (correspondant aux conditions « ambiantes »), mais que cet effet s'annulait pour de fortes teneurs en eau. De même, l'effet était très prononcé jusqu'à quelques kHz, mais l'écart entre bois traité et non traité diminuait vers 5KHz.

A l'inverse des cas précédents, Obataya [Obataya et al 1999a,b] trouvait que la Canne de Provence (*Arundo donax*) utilisée pour les clarinettes voyait son amortissement diminuer au fur et à mesure qu'elle était jouée et « délavée », ce qui rendait le son trop « criard ». Ces auteurs montrent que dans ce cas, des extractibles de type sucres étaient extraits, et donc que, dans la Canne de Provence native, ces composés augmentaient l'amortissement – paramètre désirable dans ce cas.

Ces études fondatrices montraient que les extraits, jusqu'alors considérés comme ayant peu ou pas d'influence sur les propriétés mécaniques, pouvaient en fait avoir des répercussions importantes sur les propriétés vibratoires de certaines espèces, voire permettre des modifications chimiques naturelles. Il reste cependant bon nombre de questions à élucider.

### II.3.2 Recherches en cours

Les extractibles sont très variables, tant dans leurs quantités présentes, que dans leur nature chimique et leur localisation dans la structure du bois, or jusqu'ici un petit nombre d'espèces avait été étudié pour ces aspects.

Nous avons étudié une quinzaine d'espèces de bois tropicaux choisis pour avoir des teneurs en extraits aux solvants organiques très différentes (de 1 à 25%). Dans la mesure où, entre différents arbres et espèces, les angles de microfibrilles et les modules spécifiques varient fortement, afin de comparer les amortissements des différentes espèces, nous avons rapporté (Figure 4 à gauche) ces amortissements à la courbe des « bois standards » [Ono et Norimoto 1983, 1984] et défini un écart en %. La figure 4 montre la relation entre les déviations d'amortissement, et les teneurs en extraits, pour 18 arbres provenant de 14 espèces.

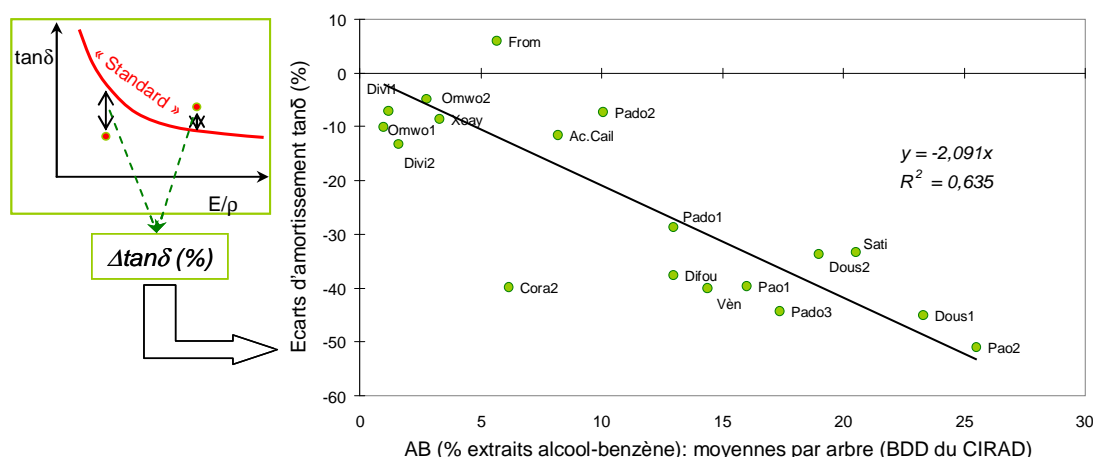


Figure 4 : Relation entre les déviations de l'amortissement par rapport aux bois « normaux », et teneurs en extraits aux solvants organiques (un point = moyenne sur un arbre ; 14 espèces de feuillus tropicaux) [Brémaud 2006].

Ces résultats indiquent que :

- les bois à faibles taux d'extraits sont effectivement proches de la tendance « standard » ;
- l'amortissement devient de plus en plus faibles par rapport à la moyenne – jusqu'à deux fois plus faible- lorsque les bois contiennent plus d'extraits (espèces ou arbres individuels) ;
- la quantité n'explique pas tout : pour des bois contenant 5-10% d'extraits, on peut avoir des amortissements un peu plus élevés que la moyenne, un peu plus faibles, ou 40% plus faibles. La relation est toutefois suffisamment claire, et en l'élargissant à de plus nombreuses espèces, elle nous a permis de prédire une gamme réaliste de valeurs d'amortissement pour des bois jusqu'alors mal connus [Brémaud 2006].

Les différences d'effets en fonction des espèces et/ou types de composés méritent d'être étudiées en détail : certains composés sont spécifiques à une espèce, chaque espèce contient différents composés. Nous avons testé les effets respectifs des extraits retirés par différents solvants (ceux-ci atteignent des composés de nature différente, mais aussi localisés différemment dans la structure du bois), sur le bois de Padouk d'Afrique (*Pterocarpus soyauxii*), qui est utilisé en xylophones, a de très faibles amortissements, et une composition particulière en extractibles. Les résultats sont présentés sur la figure 5.

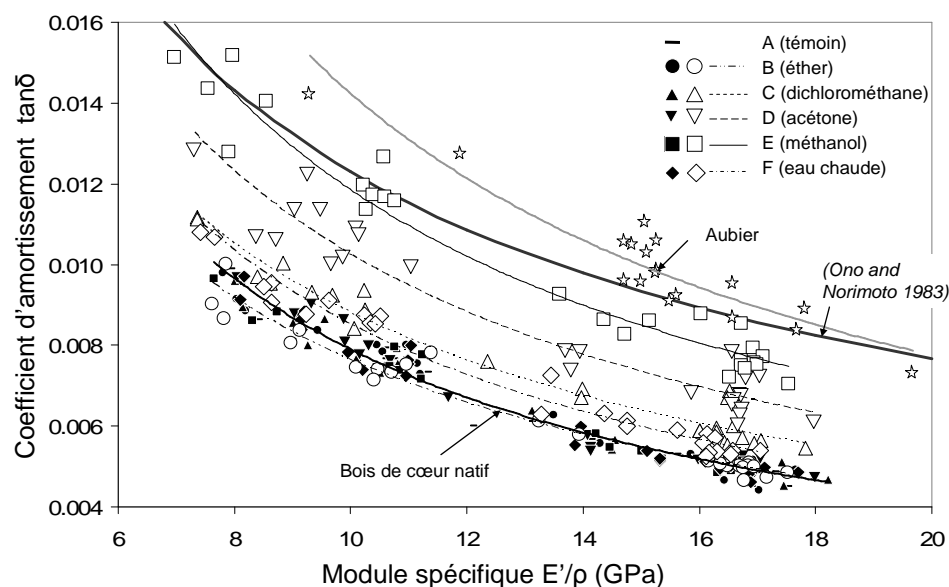


Figure 5 : Relation entre coefficient d'amortissement  $\tan\delta$  et module spécifique  $E'/\rho$  pour du bois de Padouk (*Pterocarpus soyauxii*). La gamme de variation de  $E'/\rho$  reflète les variations d'angles de fil de ce bois contrefilé. Les symboles pleins représentent le bois de cœur non traité, les symboles ouverts le même bois de cœur après extractions successives. Les étoiles représentent l'aubier non traité. [Brémaud 2008].

Tout d'abord, on peut voir que le bois de cœur est beaucoup moins amortissant que la moyenne, tandis que l'aubier est presque « standard », et la relation entre coefficient d'amortissement et module spécifique reste de la même forme. Après extractions successives, la relation reste de la même forme, et les valeurs d'amortissement « remontent » progressivement vers celles des bois « normaux »,

sans que le module spécifique ne soit affecté [Brémaud 2008]. Nous avons mis en relation ces effets, avec les quantités d'extraits retirés de la matière des parois, ou bien des « vides » des cellules : les composés retirés des « vides » ne modifient pas les propriétés, tandis que l'amortissement augmente d'environ 10% pour chaque % d'extrait retiré des parois. Par ailleurs, certaines fractions provoquent également des variations – beaucoup plus modestes – de la teneur en eau en conditions « ambiantes » régulées, mais l'effet propre « extractibles » sur l'amortissement est clairement distinct de l'effet via les teneurs en eau.

Bien d'autres travaux sont en cours sur ce sujet (types de molécules impliquées, mécanismes d'action, typologie des espèces concernées...), mais dans l'état actuel des choses, il apparaît que les extractibles sont un facteur important dans la détermination d'une bonne stabilité à la fois viscoélastique (faibles amortissement) et hygroscopique (sensibilité réduite aux variations d'humidité ambiante). De plus, les typologies en cours d'élaboration semblent indiquer que ces effets sont présents dans le cas de nombreuses essences tropicales importantes en facture instrumentale.

### III Gammes de propriétés de bois emblématiques en facture instrumentale

#### III. 1 Propriétés moyennes de quelques bois archétypes

Plusieurs sources de données existent quant aux propriétés vibratoires des principaux bois d'instruments de la musique savante Occidentale : on peut par exemple trouver des listes et/ou analyses concernant ces bois bien connus dans [Bucur 1995 ; Fletcher et Rossing 1998 ; Haines 2000 ; Wegst 2006 ; Yoshikawa 2007]. Des données ciblées par espèce et portant sur de plus grands échantillons ont été publiées par plusieurs chercheurs Japonais (travaux de Ono, Norimoto, Yano, Hase, Obataya, Matsunaga, et co-auteurs, voir liste bibliographique).

La figure suivante (6) résume les propriétés moyennes de densité, module d'Young, module spécifique et coefficient d'amortissement pour des bois archétypes en facture.

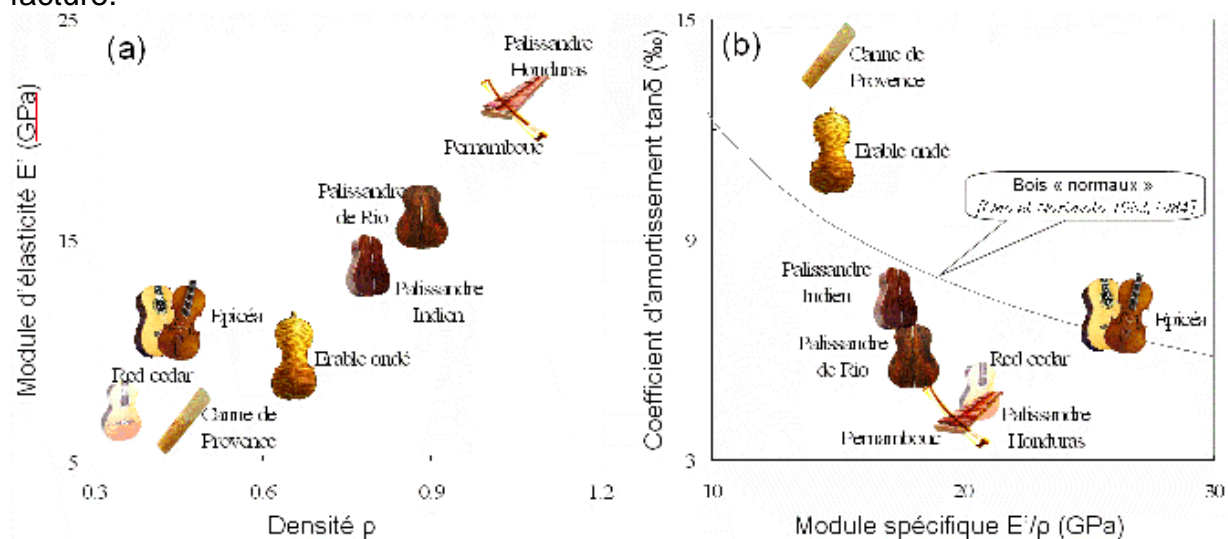


Figure 6 : Propriétés moyennes (en direction longitudinale) de bois emblématiques en facture instrumentale : (a) densité et module d'Young ; (b) module spécifique et coefficient d'amortissement.

La comparaison de ces propriétés moyennes rappelle clairement les différences de gammes de valeurs entre bois représentatifs pour certaines parties d'instruments. On peut aussi repérer les différences entre différents bois employés pour une même partie (Epicéa vs. Red Cedar pour les tables de guitare, Palissandre de Rio vs. Palissandre Indien pour les fonds...). Par ailleurs, la figure 6b met en relief le fait que bon nombre d'essences importantes –notamment de feuillus tropicaux- présentent des amortissements bien plus faibles que les bois « normaux » définis par [Ono et Norimoto 1983, 1984]. En l'occurrence ceci est relié, d'un point de vue « sciences du bois » à l'effet des extractibles.

Mais bien sur, la figure 6 présente des valeurs moyennes seulement, d'une part, et d'autre part, des bois dont l'usage est très connu dans la facture d'instruments « Occidentaux ».

### **III.2 Relations avec les jugements de facteurs**

#### **III.2.1 Bois de tables d'harmonie**

Les bois des tables d'harmonie d'instruments à cordes de la musique savante Occidentale sont probablement ceux ayant attiré le plus de recherches scientifiques. Malgré cela, il reste encore bien des zones d'ombre dans la connaissance de ce sujet...

L'Epicéa (*Picea abies*) est de notoriété publique le bois « archétype », et les manuels de lutherie donnent de nombreuses indications sur les critères « empiriques » de choix des pièces de bois, notamment en termes de densité, largeur de cernes et texture (cf. remarque ci-dessus). D'un point de vue des propriétés vibratoires, Ono [Ono et Norimoto 1983] rapporte que les bois « sélectionnés par des facteurs expérimentés » (piano) sont caractérisés par de forts modules spécifiques, de faibles amortissements, ces deux paramètres étant très bien corrélés entre eux, et avec l'angle de microfibrilles. Yano [Yano et al 1992] trouvait les mêmes tendances moyennes (plus une densité plus faible des bois les mieux classés) sur des fournitures en Epicéa (*Picea abies*) classées par un luthier du quatuor. Cependant, les gammes de variation de propriétés des grades « inférieur », « moyen » et « meilleur » se recoupaient. Pour ce qui est de la variabilité, on pourrait aussi penser à un effet expérimental, les éprouvettes destinées aux tests étant de bien plus petites dimensions que les tables d'harmonie. A ce sujet, les coefficients de variations mesurés entre différentes parties de tables de piano (*Picea sitchensis*) étaient de l'ordre de 14% pour la densité et 33% pour le module et l'amortissement [Kataoka et Ono 1976]. Quoiqu'il en soit, il semble délicat de définir des valeurs uniques étroites de propriétés vibratoires et densités : les bois de table sont bien dans la gamme maximale du module spécifique, et minimale de l'amortissement, dans l'espèce, mais à l'intérieur de cet ensemble, les luthiers/facteurs choisissent de façon individuelle, ou bien peuvent s'adapter lors de la fabrication à des variations relativement restreintes. Ceci a récemment été mis en avant par Buksnowitz [Buksnowitz et al 2007], qui trouvait plus de liens entre critères visuels et qualification par des luthiers, qu'avec les propriétés « acoustiques ». Cependant, la faible proportion de bois « hors gamme lutherie » dans cette étude limite un peu la portée des analyses statistiques. Norimoto [Norimoto 1982 ; Norimoto et al 1984] trouvait également que certaines « qualités » d'Epicéa de Sitka (*Picea sitchensis*) destinées à la facture

semi-industrielle de tables de piano étaient rejetées d'après des critères visuels de « défauts » (aspect rougeâtre, veines légères de résine, petit nœuds occasionnels...) sans que leur gamme de densité et de propriétés vibratoires ne soit significativement différente des pièces acceptées. Par contre, l'aulxier, qui est difficile à différencier de visu sur l'épicéa, présentait de plus forts amortissements liés à de plus fortes teneurs en eau. Par ailleurs, il serait intéressant d'effectuer une étude systématique auprès de plusieurs luthiers en guitares, dans la mesure où la géométrie des fournitures de bois pour table permet une meilleure appréhension « empirique » des propriétés mécaniques/acoustiques.

En tout état de cause, les propriétés moyennes de la gamme « Epicéa de lutherie » sont présentées dans le tableau 1, ainsi que d'autres bois importants en instruments à cordes occidentaux.

Le Red Cedar, employé pour la facture des tables de guitares alternativement avec l'Epicéa, est plus léger, a un module d'élasticité spécifique plus faible et un coefficient d'amortissement beaucoup plus faible que l'Epicéa [Yano 1994]. De façon très résumée, des guitares ayant la table faite en ce bois avaient été classées comme plus « chaleureuses » et moins « sèches » qu'en Epicéa [Douau 1986]. Mais bien sûr il existe des préférences individuelles.

Tableau 1 : Propriétés vibratoires moyennes de bois « archétypes » en facture d'instruments à cordes occidentaux, d'après [Bucur 1995 ; Yano et al 1995 & 1997 ; Matsunaga et al 1996 ; Haines 2000]. Indice L : direction axiale ; indice R : direction radiale. Gammes de fréquences entre 200 et 700 Hz. E et E'/ $\rho$  en GPa,  $\tan \delta$  en ‰.

Essence	$\rho$	E <sub>L</sub>	E <sub>L</sub> / $\rho$	$\tan \delta_L$	E <sub>R</sub>	E <sub>R</sub> / $\rho$	$\tan \delta_R$
Epicéa	0,43	15,0	26-33	6,7	0,7	1,5	20,4
Red Cedar	0,35	7,3	20,7	4,8	0,62	1,7	10,4
Erable (ondé)	0,66	10,0	15,1	12,1	2,2	3,3	21,3
Palissandre de Rio	0,86	15,5	18,1	5,8	2,0	2,3	14,7
Palissandre Indien	0,77	13,4	17,4	7,3	2,3	3,0	14,3
Pernambouc	0,92	18,2	19,8	4,1			

Enfin, il faut garder à l'esprit que les tables d'harmonie sont loin d'être toutes faites d'Epicéa, ni de bois de résineux, ni même de bois légers : c'est par exemple le cas pour le Mûrier (*Morus alba*) employé pour les Biwa Japonais [Yoshikawa 2007] et pour des instruments Iraniens [voir la communication de K. Pourtahmasi]. Les répartitions géographiques de ces choix de bois très différents, en lien avec les techniques de facture et les styles de jeu, semblent être un thème à approfondir ; entre autres, via une analyse de la base de données présentée plus loin.

### **III.2.2 Bois de touches de percussions à claviers (« xylophones »)**

Les propriétés souhaitables pour les matériaux des touches de ces instruments ont pu être résumées comme étant : « dureté et résistance élevées, faible tendance à fendre ou à éclater, faible coefficient de perte, fort module d'Young, forte densité » [Holz 1996]. Pour les instruments de facture occidentale, les bois employés sont de la tribu des Dalbergioideae (Leguminosae), parmi lesquels le Palissandre du Honduras (qui a été proposé à la CITES mais non encore indexé), mais aussi, souvent le Padouk d'Afrique (bois très important dans la facture des instruments de type xylophone en Afrique Centrale et de l'Ouest). En ce qui concerne l'aspect « sonore » proprement dit, il existe quelques études associant perception et jugement par des facteurs, et propriétés mesurées. [Hase 1987] rapporte que l'amortissement est la variable la mieux corrélée avec l'évaluation sensorielle de barres de géométrie identique de Palissandre du Honduras ; ces résultats sont particulièrement intéressants dans la mesure où la gamme du coefficient d'amortissement (de 3.6 à 4.6‰) était réduite dans la plage minimale pour le bois. Les résultats préliminaires de [Curie 1989] sur des essences diverses allaient dans le même sens. Plus récemment, Brancheriau et Aramaki [Brancheriau et al 2006 ; Aramaki et al 2007] ont confirmé le rôle primordial de faibles valeurs d'amortissement dans la classification « acoustique » de barres de xylophones.

Par ailleurs, il est intéressant de constater que les bois (tropicaux) employés dans les percussions à clavier de facture occidentale ne sont pas forcément les mêmes que ceux employés dans des instruments traditionnels de pays tropicaux. À partir de la base de données présentée plus loin, nous nous intéressons à la mise en relation des différentes espèces employées, et de leurs propriétés vibratoires.

### **III.2.3 Bois d'archets**

Le cas des bois d'archets est intéressant d'un point de vue mécanique, et a des implications fortes en termes de choix de matière première, particulièrement depuis l'inscription du Pernambouc à l'annexe 2 de la CITES en juin 2007. Des caractérisations mécaniques du Pernambouc (et éventuellement d'autres espèces ou matériaux) ont été menées par [Sugiyama et al 1994 ; Vaiedelich 1995 ; Matsunaga et al 1996 ; Wegst et al 2004 ; Brémaud 2006]

Sugiyama et Matsunaga [Sugiyama et al 1994 ; Matsunaga et al 1996] observaient que la gamme de densité et de module d'Young du Pernambouc se recouvrait avec celles d'autres espèces, mais que ce bois présentait des facteurs d'amortissement exceptionnellement faibles ; ils en déduisaient que ce paramètre était un facteur clef dans le choix de cette espèce pour les archets « modernes ». D'un autre côté, Wegst [Wegst et al 2004] suggèrent que le Pernambouc puisse présenter des valeurs exceptionnellement fortes de module pour sa gamme de densité – mais ceci est très variable. D'après nos propres essais, des « bonnes » qualités de Pernambouc présentaient effectivement de plus forts modules que des qualités « moyennes », et toujours un amortissement extrêmement faible [Brémaud, non publié]. Matsunaga [Matsunaga et al 1996] mettaient aussi en avant l'importance d'autres caractéristiques physico-mécaniques : résistance à la rupture en cisaillement, aptitude au cintrage et rétention de la courbure... Par ailleurs, le cas des archets de « musiques anciennes » est encore peu étudié. Il semble en tout cas qu'une étude

extensive des relations entre propriétés des bois d'archets et qualification par les usagers (archetiers, musiciens) reste à faire.

#### IV Diversité des bois – diversité des instruments : création d'une base de données spécifique

Les informations présentées ci-dessus concernent des bois bien connus employés dans la facture d'instruments de musique savante occidentale. Même pour ces bois « bien connus », on peut constater que les caractérisations mécaniques ne sont pas forcément exhaustives, et qu'une mise en relation de différentes études permet de mieux appréhender leurs propriétés spécifiques. Par ailleurs, on a évoqué rapidement un point qui semble fort important dans une optique interculturelle : quels sont les bois choisis pour différents types d'instruments, dans différentes cultures géographiques et/ou historiques ? Comment le matériau participe-t-il aux spécificités d'un patrimoine donné ? Peut-on établir des relations entre ces choix de bois et les propriétés « acoustiques » ? Malheureusement, les informations sur ces questions sont assez rares, éparses, et notamment, les données sur les propriétés vibratoires incluant l'amortissement sont peu accessibles et « éparpillées ». Dans cette optique, j'ai créé une base de données dédiée aux bois employés en facture à travers le monde, et aux propriétés vibratoires des bois. Sa structure et quelques illustrations sont présentées ci-dessous.

##### IV.1 Structure et contenu de la base de données

L'architecture de la base de données est schématisée sur la figure 7. Elle est centrée autour du module « espèces ligneuses », dans lequel l'attribut unique « nom botanique » permet des liens avec des sous-modules concernant la nomenclature et la description de l'espèce et du bois. Grâce à cet attribut unique, les espèces sont liées à leurs usages en facture, dans le module « instruments », et à toutes les données disponibles sur leurs propriétés vibratoires dans un module spécifique. Les données proviennent d'une revue de la littérature (129 sources consultées pour le moment, en 7 langues), ainsi que d'interviews avec des luthiers et chercheurs, complétés par notre travail expérimental pour les propriétés vibratoires.

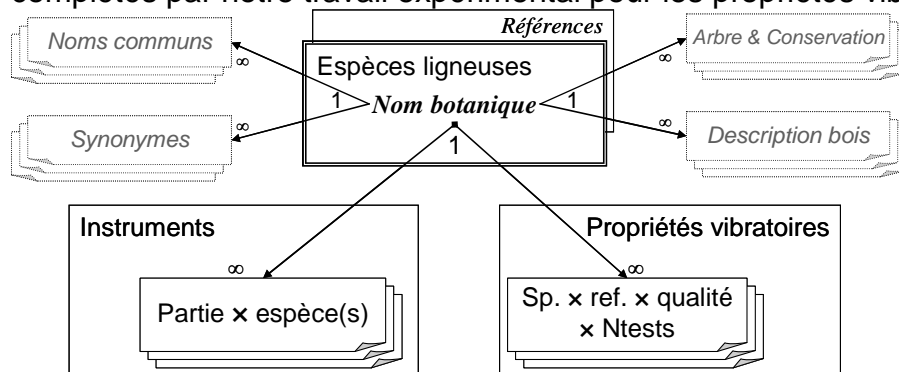


Figure 7 : Schéma de l'architecture de la base de données : « modules » et relations [Brémaud 2007].

#### **IV.1.1 Module « espèces ligneuses »**

Un nom botanique unique est le seul noyau possible pour assurer des liens dynamiques entre les différentes catégories d'informations. Pour remplir cette fonction, il est impératif que les noms botaniques soient valides et exempts de fautes d'écriture. Ce module recense les espèces, catégorisées par « type » (résineux, feuillus tempérés ou tropicaux, monocotylédones...). Il est associé à deux « dictionnaires » : les noms communs rencontrés dans différentes langues ; les synonymes botaniques (noms invalides, nomenclatures anciennes ayant été révisées...). Ceci permet de retrouver une espèce sans forcément connaître son nom botanique valide. A chaque espèce sont associées différentes catégories d'information : répartition géographique, informations sur l'arbre (dimensions...), la conservation de l'espèce [IUCN 2008] et son indexation ou non à la CITES (Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction – Convention de Washington) [CITES 2008]. Des descriptions d'ordre général sur le bois sont aussi implémentées.

#### **IV.1.2 Module « usages en instruments »**

L'entité centrale de ce module est l'association « partie d'instrument – espèce employée ». Pour chaque instrument recensé, on entrera autant d'occurrences que de parties fois les différentes essences citées pour la fabrication de chaque partie. Pour éviter les fautes d'écriture dans les noms botaniques, ceux-ci sont sélectionnés dans une liste générée à partir du module « espèces ». Pour chaque occurrence, différentes informations additionnelles peuvent être implémentées quand elles sont disponibles: fréquence d'emploi (bois préféré, occasionnel, substitut...); « qualité » ou « type » de facture pour l'emploi de ce bois ; critères de choix décrits (visuel, acoustique, disponibilité, etc) ; date de l'information d'usage ; remarques diverses. Un individu « instrument » est défini par son nom, et sa région d'origine (i.e. en terme de choix des bois, une guitare classique fabriquée au Brésil peut être assez différente d'une fabriquée en Europe). Les instruments peuvent être liés à leur classification organologique (d'après [Hornbostel et Sachs 1914/1961]).

#### **IV.1.3 Module « propriétés vibratoires »**

Les données proviennent d'une synthèse de la littérature (y compris des sources rares ou non publiées) et de nos caractérisations expérimentales [Brémaud 2006]. Le jeu systématique de données physico-mécaniques contient : conditions de mesures (voir ci-dessous) ;  $\rho$  = densité ;  $E$  = module d'Young ;  $E/\rho$  = module spécifique ;  $\tan\delta$  : coefficient d'amortissement (ou de perte) ; dans la direction longitudinale du bois (lorsque des données sur l'anisotropie sont disponibles elles sont entrées aussi, mais ces données ne sont guère abondantes).

Les propriétés vibratoires étant très sensibles –surtout l'amortissement- aux conditions hygrothermiques et de fréquence, il est nécessaire de vérifier attentivement la compatibilité des conditions de mesures entre différentes études. La grande majorité des données implémentées ont été obtenues sur des échantillons de bois stabilisés dans des conditions standards « sec à l'air » (20°C et 65% d'Humidité Relative). Des conditions stabilisées entre 18-25°C et 55-65%HR restent acceptables dans la mesure où leur effet (environ 6% de variation d'amortissement sur l'Epicéa



d'après Obatya [Obataya et al 1998]) est raisonnablement faible par rapport à la variabilité intra- et inter-spécifique. Les fréquences de mesure sont dans la majorité des essais entre 200-800Hz. Ici aussi, une gamme un peu plus large de 800-2000Hz reste acceptable, puisque dans cette gamme la dépendance fréquentielle est très modérée [Ono & Kataoka 1979a,b; Nakao & al 1985] et ses effets petits devant la variabilité. Lorsque des données obtenues à des fréquences plus élevées sont disponibles, elles sont enregistrées séparément.

#### IV.1.4 Quantité d'information à l'heure actuelle

En résumé, à l'heure actuelle (Avril 2008), la base de données « Bois, instruments du Monde et propriétés vibratoires » réunit des informations sur :

- 627 espèces ligneuses dont la nomenclature a été vérifiée (espèces représentées par au moins une information « usages en facture » et/ou « propriétés vibratoires »), ces espèces sont associées à environ 8000 noms vernaculaires ;
- 332 espèces avec propriétés vibratoires viscoélastiques (couvrant ≈5500 séries d'essais) ;
- 310 espèces employées en instruments de musique du monde ;
- 166 instruments « individuels » (= instrument x région x type de facture) ;
- Environ 900 occurrences « partie d'instrument – espèces employées » (dont environ 700 pour les parties à fonction structurale).

La répartition des usages en facture déjà implémentés selon les familles organologiques (A) et selon les régions du Monde (B) est résumée sur la Figure 8. L'implémentation des données d'usages en facture a été tout d'abord orientée vers des informations relativement moins connues, qui concernent en majorité des usages dans des traditions de facture extra-européennes (Figure 8B). L'implémentation se poursuit actuellement, en incluant bien sûr progressivement les informations relatives aux factures « Occidentales ». L'accent a aussi été porté en premier lieu sur les cordophones et idiophones (Figure 8A), pour lesquels l'influence des propriétés vibratoires du matériau est mieux documentée. Les usages en facture d'aérophones et de membranophones ne sont toutefois pas laissés de côté et continuent à être implémentés.

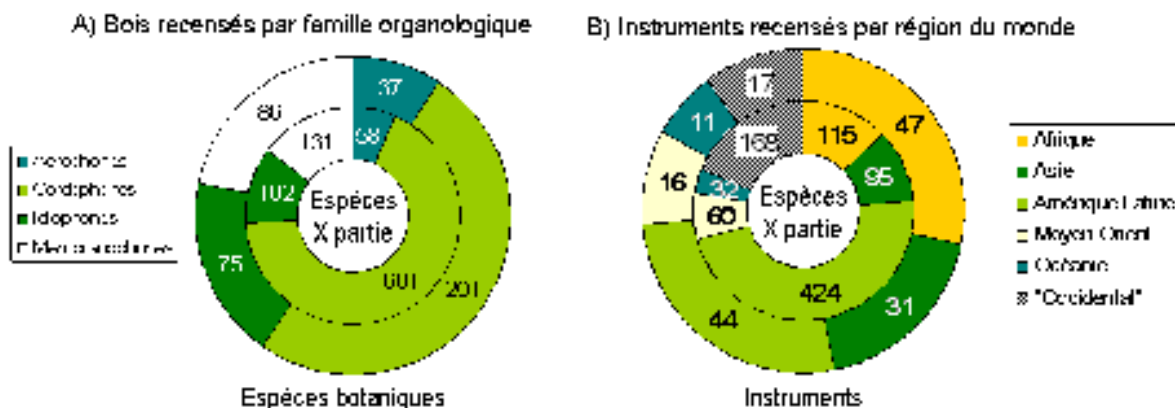


Figure 8 : Répartition des informations contenues dans la base de données selon : (A) les familles organologiques (nombres d'espèces employées et nombres d'associations bois-parties) ; (B) les aires géoculturelles de facture (nombre d'instruments et nombre d'associations bois-partie).

En ce qui concerne les données de propriétés vibratoires, le plus grand nombre d'espèces est représenté par les feuillus tropicaux (ce qui est logique compte tenu de leur très grande biodiversité), puis par les feuillus tempérés, enfin par les résineux. Mais on peut voir sur la figure 9 que les résineux ont bénéficié de près de la moitié des efforts de caractérisation (en terme de nombre de séries d'essais effectuées). Par ailleurs, on manque encore de données sur les propriétés vibratoires des monocotylédones (bambous, roseaux, palmiers...).

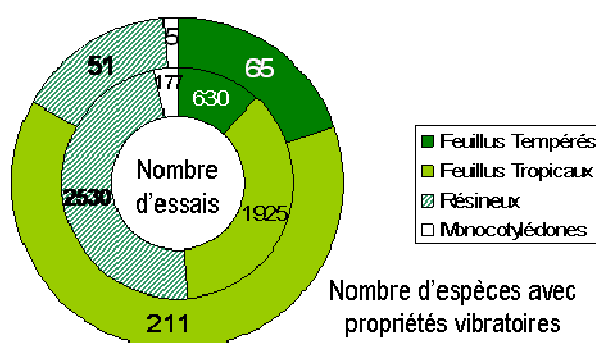


Figure 9 : Répartition des données de propriétés vibratoires selon les catégories d'espèces.

Finalement, les ensembles « usages en facture » et « propriétés vibratoires » se recoupent dans des proportions variables : la base de données relie d'ores et déjà propriétés et usages pour environ 50% des bois employés en instruments occidentaux, et environ 40% pour les instruments d'Asie, mais plus de caractérisations seraient à effectuer pour les bois d'Afrique, d'Océanie, du Moyen-Orient...

#### IV.2 Exemples de synthèses à partir de la base de données

Cette base de données rend possible plusieurs niveaux d'analyses, et permet de générer des synthèses sur les propriétés vibratoires entre différentes espèces ou qualités dans l'espèce.

Quelques exemples d'analyses possibles :

- Variations de matériaux pour une partie donnée ;
- Comparaison interculturelle des choix de matériaux ;

Toutes les espèces recensées pour une partie d'instrument peuvent être extraites et comparées, que ce soit pour un seul instrument donné (par exemple : les bois employés pour les tables d'harmonie de guitares, y compris celles fabriquées dans différents continents), ou bien dans une vue interculturelle (par exemple : essences employées pour les tables et caisses de résonance de cordophones dans différentes cultures ; espèces employées pour les touches de « xylophones » dans différents continents).

- Gamme de variation de propriétés vibratoires pour une espèce donnée, couvrant les différentes recherches et caractérisations déjà effectuées ;
- Comparaison des gammes de propriétés d'essences proches : on peut par exemple confronter les données existantes sur différentes espèces de Palissandres vrais (*Dalbergia spp.*), comme présenté sur la figure 10.

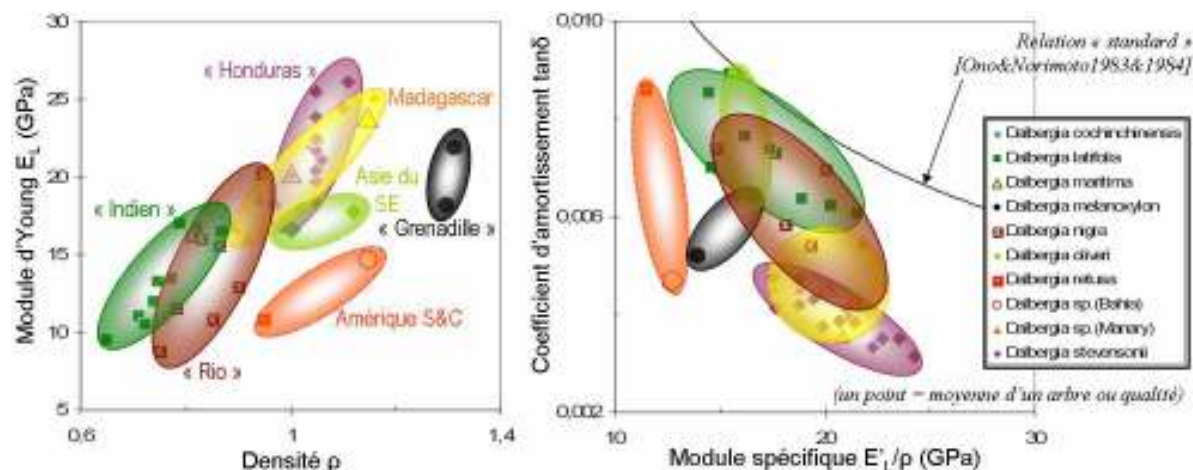


Figure 10 : Comparaison des gammes de propriétés entre Palissandres vrais (*Dalbergia spp.*) : densité et module d'Young (à gauche) ; module spécifique et amortissement (à droite).

Cet exemple concerne différents aspects : variations dans une espèce et entre différentes espèces botaniquement proches ; entre continents ; mais aussi caractérisation d'espèces culturellement importantes mais aujourd'hui menacées et/ou d'approvisionnement limité (une grande proportion des *Dalbergia spp.* sont classées comme vulnérables par [IUCN 2008]). D'autres catégories d'analyses rendues possibles par la base de données concernent alors :

- Recherches d'essences secondaires ou mal connues comme alternatives potentielles ;

Il est possible de trier les espèces selon leur statut de conservation. Celles menacées peuvent ensuite être comparées, sur la base de leurs propriétés vibratoires, à d'autres espèces, y compris toutes celles qui ne sont pas encore représentées par des informations d'usages en instruments.

## V Conclusion & Perspectives

Cet article présentait certains aspects de la variabilité des bois et de leurs propriétés vibratoires en lien avec leurs usages en facture.

Parmi les différentes échelles du bois, dans le cas d'un résineux « modèle » sans déviations de fil et sans extractibles, on peut considérer que les facteurs déterminant les propriétés vibratoires sont, en tout premier lieu l'angle des microfibrilles de cellulose dans les parois, suivi dans une moindre mesure par les variations de cristallinité et/ou de composition de la matrice visqueuse. Dans le cas de plusieurs bois tropicaux (mais aussi de certaines essences tempérées) les taux d'extraits du bois de cœur peuvent devenir le déterminant principal des coefficients d'amortissement sur des bois « de droit fil ». Cet effet est observable sur plusieurs bois importants en facture. Ces différentes causes de variations résultent en une gamme totale de propriétés vibratoires élémentaires de 0,2-1,4 pour la densité, de 7-36GPa pour le module spécifique longitudinal, de 3-18‰ pour le coefficient d'amortissement longitudinal.

Quelques tendances sont assez claires en termes des propriétés préférées pour certaines parties d'instruments bien connus (tables d'harmonies, touches de

xylophones...), mais ces aspects demandent encore à être approfondis, et particulièrement dans une vue interculturelle.

Une base de données relationnelle spécifique à cette thématique a été mise en place et regroupe actuellement des informations d'usages en facture et/ou de propriétés vibratoires viscoélastiques pour plus de 600 espèces ligneuses. Elle permet la mise en relation de caractérisations mécaniques et d'informations culturelles et sur la conservation des espèces. Cette base de données a vocation à être élargie et mise en ligne. L'adjonction de nouvelles catégories d'informations est également en cours. Par ailleurs, la caractérisation mécanique des bois employés en facture d'instruments des différentes cultures du Monde demande encore un effort de recherche soutenu.

## Bibliographie

- [1] Aizawa Hideo, et al., « Acoustic converting efficiency and anisotropic nature of wood », *Wood research* n°85, 1998, p 81-83.
- [2] Aramaki Mitsuko, et al., « Sound quality assessment of wood for xylophone bars », *Journal of the Acoustical Society of America* vol.121, n°4, 2007, p 2407-2421.
- [3] Barlow Claire, « material selection for musical instruments", *Proceedings of the institute of acoustics* vol.19, n°5, 1997, p 69-78.
- [4] Brancheriau Loic, et al., « Classifying xylophone bar materials by perceptual, signal processing and wood anatomy analysis », *Annals of Forest Science* vol.63, 2006, p 73-81.
- [5] Brémaud Iris, Diversité des bois utilisés ou utilisables en facture d'instruments de musique. -Etude expérimentale des propriétés vibratoires en direction axiale de types de bois contrastés en majorité tropicaux. -Relations à des déterminants de microstructure et de composition chimique secondaire, Doctorat en Mécanique des Matériaux, Université Montpellier II, 2006, 302.
- [6] Brémaud Iris, et al., « Respective effects of anisotropy and of extractives on the vibrational properties of African Padauk (*Pterocarpus soyauxii* Taub., Papilionaceae). II. Sequential extraction. » (soumis, 2008).
- [7] Brémaud Iris, et al., « A database linking woody species, vibrational properties, and uses in musical instruments of the world ». In: *ISMA (International Symposium on Musical Acoustics) 2007*, la dir. de), 9-12 September 2007. Barcelona, Spain, 2007
- [8] Bucur Voichita, *Acoustics of wood*. Boca Raton, CRC Press, 1995, p.284.
- [9] Buksnowitz Christoph, et al., « Resonance wood [*Picea abies* (L.) Karst.] – evaluation and prediction of violin makers' quality-grading », *Journal of the Acoustical Society of America* vol.121, n°4, 2007, p 2384–2395.
- [10] CITES, Convention on International Trade of Endangered Species of Wild Fauna and Flora, <http://www.cites.org/> (Mars 2008).
- [11] Curie Philippe (1989) Étude Provisoire des relations entre qualité acoustique d'un bois en percussion et caractéristiques de résonance mesurées en laboratoire. In. Centre technique Forestier Tropical, Nogent sur Marne, p 9.
- [12] Douau Dominique, Evaluation des propriétés acoustiques, mécaniques et structurelles des bois de tables d'harmonie de guitare; leur influence sur le timbre de l'instrument, Thèse 3ème cycle en Acoustique, Université du Maine, 1986, 137.

- [13] Fletcher Neville H., Rossing Thomas D., *The physics of musical instruments*, 2<sup>nd</sup> edn. New-York, Springer Verlag, 1998, p.756.
- [14] Gachet Christophe, Guitard Daniel, « Influence relative de la morphologie cellulaire et de l'angle des microfibrilles sur l'anisotropie élastique tissulaire Longitudinale/Tangentielle du bois sans défaut des résineux », *Annals of Forest Science* vol.63, 2006, p 275-283.
- [15] Haines Daniel W., « The essential mechanical properties of wood prepared for musical instruments », *Catgut Acoustical Society Journal* vol.4, n°2 (series II), 2000, p 20-32.
- [16] Hase Nobushige, « A comparison between acoustic physical factors of Honduras rosewood for marimbas and xylophones and a sensory evaluation of these instruments », *Mokuzai Gakkaishi* vol.33, n°10, 1987, p 762-768.
- [17] Holz Dietrich, « Acoustically important properties of xylophone-bar materials: can tropical woods be replaced by European species? » *Acustica united with Acta Acustica* vol.82, 1996, p 878-884.
- [18] Hori R., et al., « The importance of seasonal differences in the cellulose microfibril angle in softwoods in determining acoustic properties », *Journal of Materials Science* vol.37, 2002, p 4279-4284.
- [19] Hornbostel Erich M. Von, Sachs Curt, « Classification of Musical Instruments - Translated from the original german (1914) by Anthony Baines and Klaus P. Wachsmann », *Galpin Society Journal* vol.14, 1961, p 3-29.
- [20] IUCN, International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, <http://www.iucnredlist.org/> (Mars 2008).
- [21] Kataoka Akeo, Ono Teruaki, « The dynamic mechanical properties of Sitka Spruce used for sounding boards », *Mokuzai gakkaishi* vol.22, n°8, 1976, p 436-443.
- [22] Kubojima Yoshitaka, et al., « Effect of annual ring widths on structural and vibrational properties of wood », *Mokuzai gakkaishi* vol.43, n°8, 1997, p 634-641.
- [23] Matsunaga Masahiro, et al., « Physical and mechanical properties required for violin bow materials », *Holzforschung* vol.50, 1996, p 511-517.
- [24] Matsunaga Masahiro, et al., « Vibrational property changes of spruce wood by impregnation with water-soluble extractives of pernambuco (*Guilandina echinata* Spreng.) », *Journal of wood science* vol.45, n°6, 1999, p 470-474.
- [25] Matsunaga Masahiro, et al., « Working mechanism of adsorbed water on the vibrational properties of wood impregnated with extractives of pernambuco (*Guilandina echinata* Spreng.) », *Journal of Wood Science* vol.46, 2000, p 122-129.
- [26] Minato Kazuya, et al., « The vibrational properties of wood impregnated with extractives of some species of Leguminosae (Preliminary report) », *Mokuzai gakkaishi* vol.43, n°12, 1997, p 1035-1037.
- [27] Nakao T., et al., « Theoretical and experimental analysis of flexural vibration of the viscoelastic timoshenko beam », *Journal of applied mechanics* vol.52, 1985, p 728-731.
- [28] Norimoto Misato, « Structure and properties of wood used for musical instruments. I. On the selection of wood used for piano soundboards. » *Mokuzai gakkaishi* vol.28, n°7, 1982, p 407-413.
- [29] Norimoto Misato, et al., « Selection of wood used for piano soundboards (*en Japonais; Résumé, figures et légendes en Anglais*) », *Journal of the society of rheology, Japan* vol.12, n°3, 1984, p 115-119.

- [30] Norimoto Misato, et al., « Specific Dynamic Young's Modulus and Internal Friction of Wood in the Longitudinal direction (*en Japonais; Traduction Joseph Gril*) » *Wood Research and Technical Notes* n°22, 1986, p 53-65.
- [31] Obataya Eiichi, et al., « Influence of moisture content on the vibrational properties of hematoxylin-impregnated wood », *Journal of wood science* vol.47, n°4, 2001, p 317-321.
- [32] Obataya Eiichi, Norimoto Misato, « Acoustic properties of a reed (*Arundo donax* L.) used for the vibrating plate of a clarinet », *journal of the acoustical society of America* vol.106, n°2, 1999, p 1106-1110.
- [33] Obataya Eiichi, et al., « The effects of adsorbed water on dynamic mechanical properties of wood », *Polymer* vol.39, n°14, 1998, p 3059-3064.
- [34] Obataya Eiichi, et al., « Vibrational properties of wood along the grain », *Journal of Materials Science* vol.35, 2000, p 2993-3001.
- [35] Obataya Eiichi, et al., « The effects of water-soluble extractives on the acoustic properties of reed (*Arundo donax* L.) », *Holzforschung* vol.53, n°1, 1999, p 63-67.
- [36] Ono Teruaki, Kataoka Akeo, « The frequency dependance of the dynamic Young's modulus and internal friction of wood used for the soundboard of musical Instruments II. The dependance of the Young's modulus and internal friction on frequency, and the mechanical frequency dispersion (*texte en japonais; résumé, figures et tableaux en Anglais*) », *Mokuzai Gakkaishi* vol.25, n°8, 1979, p 535-542.
- [37] Ono Teruaki, Kataoka Akeo, « The frequency dependance of the dynamic Young's modulus and internal friction of wood used for the soundboard of musical Instruments. I. Effect of rotary inertia and shear on the flexural vibration of free-free beams. (*texte en japonais; résumé, figures et tableaux en Anglais*) », *Mokuzai Gakkaishi* vol.25, n°7, 1979, p 461-468.
- [38] Ono Teruaki, Norimoto Misato, « Study on Young's modulus and internal friction of wood in relation to the evaluation of wood for musical instruments », *Japanese journal of Applied physics* vol.22, n°4, 1983, p 611-614.
- [39] Ono Teruaki, Norimoto Misato, « On physical criteria for the selection of wood for soundboards of musical instruments », *Rheologica Acta* vol.23, 1984, p 652-656.
- [40] Placet Vincent, Conception et exploitation d'un dispositif expérimental innovant pour la caractérisation du comportement viscoélastique et de la dégradation thermique du bois dans des conditions sévères, Doctorat en Sciences du Bois, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2006, 337.
- [41] Sugiyama Masaki, et al., « Physical and mechanical properties of pernambuco (*Guilandina echinata* Spreng) used for violin bows », *Mokuzai gakkaishi* vol.40, n°9, 1994, p 905-910.
- [42] Vaiedelich Stephane, Matériaux composites et bois de pernambouc
- [43] *Essai de caractérisation*, Rapport de stage de DESS en Chimie Appliquée, Université de Toulon, 1995, 39.
- [44] Wegst Ulrike G. K., « Wood for sound », *American Journal of Botany* vol.93, n°10, 2006, p 1439-1448.
- [45] Wegst Ulrike G. K., et al. (2004) Materials for Violin Bows. What are the alternatives for Pernambuco? \_ Poster. In: ESWM - Symposium of the European Society of Wood Mechanics, Vila Réal, Portugal
- [46] Yano Hiroyuki, « The changes in the acoustic properties of Western Red Cedar due to methanol extraction », *Holzforschung* vol.48, n°6, 1994, p 491-495.

- [47] Yano Hiroyuki, et al., « Materials for guitar back plate made from sustainable forest resources », *Journal of the Acoustical Society of America* vol.101, n°2, 1997, p 1112-1119.
- [48] Yano Hiroyuki, et al., « Acoustic properties of Brazilian Rosewood used for guitar back plate (*en Japonais, résumé, tableaux et figures en Anglais*) », *Mokuzai Gakkaishi* vol. 41, n°1, 1995, p 17-24.
- [49] Yano Hiroyuki, et al., « Acoustic properties of wood for violins », *Mokuzai gakkaishi* vol.38, n°2, 1992, p 122-127.
- [50] Yoshikawa Shigeru, « Acoustical classification of woods for string instruments », *Journal of the Acoustical Society of America* vol.122, n°1, 2007, p 568-573.

## **Biographie**

Parallèlement à des études en biologie végétale, Iris Brémaud s'est initiée à la facture (guitare, luth). Elle a passé sa thèse (2006) dans l'équipe « mécanique de l'arbre et du bois » au Laboratoire de mécanique et de génie civil (LMGC) à Montpellier. Ce travail portait sur la diversité des bois utilisés ou utilisables en facture d'instruments de musique et leurs propriétés mécaniques. Depuis 2006, elle est post-doctorante à l'Université préfectorale de Kyoto (Pr. Minato). Elle travaille au recensement des espèces utilisées en facture et de leurs propriétés et étudie le comportement viscoélastique des bois en lien avec la composition chimique et les variations biologiques.