

Modifications des propriétés acoustiques du bois de résonance sous l'effet de sollicitations de longue durée *

Voichita BUCUR

Station de Recherches sur la Qualité des Bois
Centre national de Recherches forestières, I.N.R.A.,
Champenoux, 54280 Seichamps

Résumé

La modification des propriétés acoustiques du bois de résonance d'épicéa, de sapin et d'érable ondé, sous l'effet de sollicitations statiques et dynamiques de faible intensité (20 p. 100 de la contrainte de rupture), mais de longue durée, est mise en évidence par la méthode non destructive des ultra-sons.

L'évolution du comportement du bois est exprimé par la vitesse et l'atténuation des ultra-sons pour différentes durées de charge. La fluctuation des propriétés acoustiques du bois est attribuée à des modifications au niveau de la structure sub-microscopique du bois.

Selon la nature de la charge, et au terme d'une certaine durée, les propriétés acoustiques du bois se stabilisent. Les fluctuations du timbre des violons neufs peuvent trouver dans ce phénomène une certaine explication.

Le bois d'épicéa et le bois de sapin ont un comportement presque identique, et cette observation justifie l'utilisation du bois de sapin pour la fabrication des violons de concert.

1. — Introduction

La lutherie constitue l'utilisation la plus noble du bois.

L'Epicéa, le Sapin et l'Erable ondé peuvent donner des bois de résonance et servir à la fabrication des instruments à cordes et archets grâce à leurs propriétés mécaniques, acoustiques et esthétiques.

Il existe des relations étroites entre le comportement acoustique du bois et ses propriétés mécaniques.

Du point de vue élastique, le bois peut être caractérisé par neuf constantes indépendantes (Kollmann, 1968) et il existe des relations simples entre les constantes élastiques, notamment les modules d'élasticité et la vitesse des ondes sonores dans le bois.

Le violon et tous les instruments à cordes frottées facilitent par construction la propagation des ondes dans le bois selon les trois directions d'anisotropie.

Pour simplifier, on appellera plus loin les vitesses de propagation des ondes longitudinales, suivant les trois directions : vitesse longitudinale (V_L), vitesse radiale (V_R) et vitesse tangentielle (V_T).

* Résumé de thèse de Doctorat d'Etat : Contribution à l'étude des influences de sollicitations statiques et dynamiques de longue durée sur les propriétés acoustiques du bois de résonance (en roumain). Université de Brasov, 1977.

Les instruments à cordes frottées doivent, dans l'opinion des musiciens, présenter un certain nombre de qualités qui sont fonction des constantes acoustiques du bois de résonance utilisé. Ainsi, la clarté du jeu au violon s'exprime par la vitesse de propagation (V) du son et sa légèreté par l'impédance acoustique ($V \cdot \rho$), ρ étant la densité du bois.

Le phénomène de l'extinction du son est régi par le facteur de qualité de l'amortissement de la vibration dans le bois qui est donné par la formule :

$$Q = fr/\Delta f$$

où fr est la fréquence de résonance et Δf l'intervalle des fréquences séparant deux régions successives de la courbe de résonance où l'amplitude est réduite à $1/\sqrt{2}$ fois l'amplitude maximale.

Plus loin, nous entreprendrons une analyse des constantes élastiques et acoustiques du bois et nous essaierons de les apprécier qualitativement en fonction de la structure anatomique du bois.

2. — Les propriétés acoustiques du bois de résonance

2.1. — Les constantes élastiques et acoustiques

Pour choisir le bois de résonance d'épicéa, les luthiers font usage des critères empiriques comme :

- longues périodes de séchage naturel du bois,
- matériau totalement dépourvu d'imperfections anatomiques,

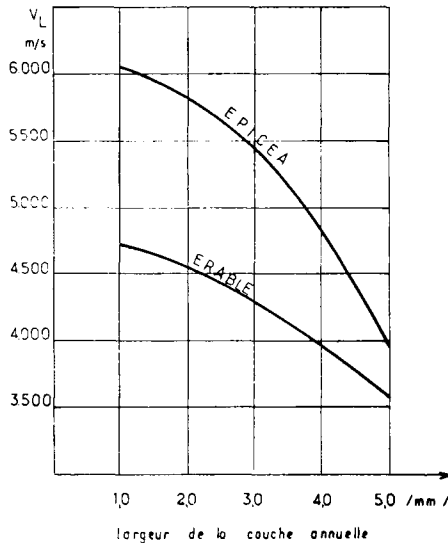


FIG. 1. — Variation de vitesse V_L en fonction de la largeur de cerne pour le bois d'épicéa de résonance et d'érable ondé.

Relationship between velocity V_L and annual ring width on resonance wood of spruce and curly maple.

- couches annuelles de 0,8 à 2,5 mm pour le violon et alto, et de 3,0 à 4,0 mm pour le violoncelle,
- régularité presque parfaite des couches annuelles,
- proportion de bois final voisine de 25 p. 100,
- densité faible.

La relation entre densité et largeur de cerne est une caractéristique importante du bois et s'applique en particulier au bois de résonance (Ghelmeziu, 1970 ; Leonhardt, 1969), mais il existe également une liaison étroite entre la largeur de l'accroissement annuel et la vitesse de propagation du son (Bucur, 1977).

Le graphique de la figure 1 montre l'importance capitale de la largeur de la couche annuelle pour la sonorité de l'instrument. Il justifie les choix empiriques des luthiers qui préfèrent des cernes étroits pour le violon et larges pour le violoncelle, car il existe une dépendance directe entre la vitesse et la fréquence d'une oscillation (à une fréquence élevée correspond une grande vitesse du son).

En ce qui concerne les constantes acoustiques du bois d'épicéa de résonance, elles sont données dans le tableau 1.

Pour le bois d'érable, le critère de sélection est l'aspect, car les individus présentant une ondulation du fil du bois sont les plus recherchés en raison du bel effet esthétique qu'ils donnent après vernissage.

Les constantes acoustiques et élastiques du bois d'érable sont données dans le tableau 2.

On note que les valeurs les plus élevées de la vitesse et de la radiation acoustiques ont été trouvées pour le bois « très ondé ».

D'autre part, le comportement du bois de résonance dans un champ vibratoire (Bucur, Pascu, 1974) est déterminé par le phénomène de friction interne exprimé par la valeur du facteur de qualité de l'amortissement de la vibration.

On peut remarquer sur le tableau 3 que les valeurs élevées du facteur de qualité sont associées à des valeurs élevées de la vitesse du son. Les différences entre les valeurs mentionnées s'expliquent par la structure anatomique du bois. Les valeurs faibles révèlent une structure complexe, qui intervient distinctement dans le phénomène de l'amortissement de l'oscillation, tandis que les valeurs élevées indiquent une structure continue, simple et uniforme qui facilite la propagation de la vibration à travers les éléments anatomiques.

Cette constatation justifie le choix des luthiers pour le bois d'épicéa pour la table, et pour celui d'érable pour le fond du violon, car la table porte le son tandis que le fond doit l'étouffer. Par ailleurs, le bois d'érable ondé débité sur « maille » a un facteur de qualité presque égal à celui de l'érable ordinaire débité sur « dosse » ; ceci explique que certains violons fabriqués avec un fond en érable ordinaire ainsi orienté aient cependant des qualités acoustiques incontestables. Cette constatation tend à prouver que le choix d'érables ondes est essentiellement dicté par des considérations esthétiques.

2.2. — *Le vieillissement du bois*

Il est unanimement admis que, pour les instruments de très bonne qualité, on a besoin de bois ayant subi un certain vieillissement naturel obtenu au terme de longues périodes de séchage. Mais, d'un autre côté, les instruments ne paraissent acquérir leur

TABLEAU 1
Les constantes acoustiques et élastiques du bois d'épicéa de résonance
Acoustical and elastic constants of Spruce resonance wood

Espèce	Pays d'origine	Densité 10^3 kg/m^3	Vitesse 10^3 m/s			Impédance $10^6 \text{ m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	Radiation acoustique $\text{m}^4 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$	Facteur de qualité Q	Constantes élastiques 10^4 daN/cm^2				Bibliographie	
			V_L	V_R	V_L/V_R				E_L	E_R	E_L/E_R	G_{RL}		E_L/G_{RL}
<i>Picea abies</i>	Roumanie	0,42	—	—	—	—	13,3	—	13,3	—	—	0,57	23	Ghelmeziu
	Italie	0,41	5,7	1,2	4,95	2,3	13,9	125	—	—	—	—	—	Barducci
	Allemagne	0,47	4,0	1,1	4,50	1,9	8,5	—	—	—	—	—	—	Kollmann
	—	—	0,40	5,4	1,5	3,60	2,2	13,5	127	10,2	0,79	12,9	—	Schelleng
	France	0,45	5,5	—	—	2,5	12,2	—	—	12,0	—	—	—	Leipp
	Canada	0,43	5,3	1,5	3,70	2,5	12,3	129	12,1	0,91	13,3	—	—	Schelleng
	Autriche	0,44	5,4	1,5	—	2,4	—	—	130	—	—	—	—	Barducci
	Russie	0,50	5,0	—	—	2,5	10,0	130	—	—	—	—	—	Barducci
	Pologne	0,45	—	—	—	—	12,0	—	—	—	—	—	—	Krzysik
	Caucase	—	—	—	—	—	12,0	—	—	—	—	—	—	—
<i>Picea sitchensis</i>	U.S.A.	0,40	5,1	1,35	3,80	2,0	12,7	120	10,4	0,73	14,2	—	—	Schelleng

TABLEAU 2
Les constantes acoustiques et élastiques du bois d'érable ondé
Acoustical and elastic constant of Curly maple

Espèce	Pays d'origine	Densité 10^3 kg/m^3	Vitesse 10^3 m/s			Impédance $10^6 \text{ m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	Radiation acoustique $\text{m}^4 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$	Facteur de qualité	Constantes élastiques 10^4 daN/cm^2				Bibliographie	
			V_L	V_R	$V_{L/R}$				$V_L \cdot \rho$	$V_{L, \rho^{-1}}$	Q	E_L		E_R
<i>Acer campestre</i>	—	0,58	3,7	1,8	1,97	2,1	6,3	60	7,7	2,2	3,5	—	—	Schelleng
<i>Acer platanoides</i>	Italie	0,68	3,8	—	—	2,6	5,6	80	9,9	—	—	—	—	Barducci
<i>Acer platanoides</i>	Italie	0,70	4,0	—	—	2,8	5,7	80	7,5	—	—	—	—	Leipp
<i>Acer pseudo platanus</i>	Italie	0,63	3,4	—	—	2,1	5,4	75	7,3	—	—	—	—	Barducci
<i>Acer spp</i>	—	0,63	3,8	1,2	3,20	2,4	6,0	—	9,2	1,5	6,0	0,89	—	Kollmann
<i>Acer pseudo platanus*</i>	Roumanie	0,50	4,4	—	—	2,2	8,8	—	11,7	1,3	8,5	—	—	Ghelmeziu Beldie

* Bois très ondé.

TABLEAU 3

Valeur de quelques constantes élastiques ou acoustiques de divers bois de résonance (Bucur, Pascu, 1974)
Some acoustical and elastical constants on resonance wood (Bucur, Pascu, 1974)

Espèce	Densité 10^3 kg/m^3	Section de l'éprouvette	Module d'élasticité Longitudinal 10^4 daN/cm^2	Vitesse longitudinale 10^3 m/s	Facteur de qualité Q
Epicéa de résonance ..	0,44	longitudinale radiale	17,0	6,3	105
Sapin de résonance ...	0,40	longitudinale radiale	16,0	6,1	100
Erable ondé	0,57	longitudinale radiale	11,6	4,5	35
Erable ordinaire	0,65	longitudinale tangentielle	15,5	4,9	45

plus beau timbre qu'à la suite d'un long usage. Ainsi, l'écoulement du temps peut intervenir en modifiant les propriétés du matériau de deux façons : soit à cause du séchage, soit à cause des sollicitations qui sont appliquées à l'instrument au cours d'un usage qui s'étend parfois sur plusieurs siècles.

Pour vérifier l'influence du vieillissement sur les propriétés acoustiques du bois, Barducci et Pasqualini (1948) ont mesuré la vitesse du son dans le bois d'épicéa et d'érable de diverses anciennetés (tabl. 4).

TABLEAU 4

L'influence du vieillissement du bois sur les constantes acoustiques (Barducci, Pasqualini, 1948)
Influence of wood ageing on acoustical constants (Barducci, Pasqualini, 1948)

Espèce	Origine	Age (ans)	Densité 10^3 kg/m^3	Vitesse (10^3 m/s)			Facteur de qualité	Impédance acoustique ($V_L \cdot \rho$)	Radiation acoustique (V_L / ρ)
				V_L	V_R	V_L / V_R		(calculées)	
								$10^6 \text{ m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	$10^4 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$
Epicéa	Italie	1	0,460	5,35	—	—	125	2,50	11,60
	Italie	10	0,410	5,70	1,15	4,95	125	2,34	14,00
	Italie	12	0,415	5,60	—	—	135	2,35	13,50
	Tyrol	52	0,410	5,40	1,50	4,70	130	2,38	12,30
	Tyrol	52	0,465	5,35	—	—	120	2,48	11,50
	Tyrol	67	0,450	5,25	—	—	115	2,47	11,70
	Tyrol	67	0,475	5,45	—	—	120	2,60	11,38
	Italie	390	0,450	4,20	0,95	4,40	95	1,90	9,30
	Erable	Italie	1	0,720	4,05	—	—	80	2,92
Italie		13	0,665	4,30	—	—	105	2,86	6,50
Hongrie		13	0,630	2,50	—	—	55	1,58	4,00
France		17	0,785	4,15	—	—	80	3,26	5,30

On constate que la vitesse longitudinale du son passe par un maximum à 10 ans : 5 700 m/s pour le bois d'épicéa et 4 300 m/s pour le bois d'érable. D'autre part, les sollicitations de longue durée ont une influence incontestable sur la qualité sonore du violon.

Des éprouvettes soumises à des efforts de vibration de longue durée peuvent simuler, plus ou moins exactement, les sollicitations réelles du bois du violon.

Les modifications observables dans les éléments anatomiques trouvent leur explication dans les travaux de Murphy (1963), Mark (1967) et Keith (1971) sur les modifications de l'indice de cristallinité de la cellulose et sur la naissance des plans de glissement dans la paroi cellulaire produits par l'accumulation des détériorations aux niveaux de la structure fine du bois.

Faisant abstraction de sa nature physique, le phénomène de fatigue peut être considéré comme une succession de processus internes irréversibles conduisant finalement à la rupture. La préparation de la rupture commence dès les premiers cycles de sollicitations et ils amènent les matériaux à une détérioration progressive. Dans le cas du bois de résonance utilisé en lutherie, il est possible que le phénomène devienne stationnaire à un certain moment déterminé par le niveau de sollicitation approprié à chaque instrument. On est ainsi amené à se poser une autre question sur le mécanisme du phénomène de fatigue du bois de résonance soumis à des efforts réduits.

3. — Les sollicitations de longue durée et les propriétés acoustiques du bois de résonance

Les sollicitations prédominantes dans la caisse du violon sont des sollicitations de flexion statique et dynamique à un niveau qui correspond à 20 p. 100 de la contrainte de rupture (0,2 R) pour lesquelles la détérioration de la structure anatomique du bois, observable au microscope ordinaire, ne se produit pas.

Le but de cette étude est de vérifier les modifications des propriétés acoustiques du bois de résonance produites par des sollicitations mécaniques de flexion statique et dynamique de longue durée sous une charge réduite (0,2 R).

3.1. — Matériel et méthode

Pour l'étude des propriétés acoustiques du bois de résonance, on a utilisé une méthode basée sur la mesure de la vitesse et de l'atténuation des ultra-sons.

L'atténuation des ultra-sons, mesurée en technique des impulsions réfléchies sur la distance émetteur-récepteur ($\alpha = 1/V \cdot \Delta t$), est l'inverse du produit de la vitesse (V) par le temps (Δt) pour lequel l'amplitude du signal observé sur l'écran de l'appareil décroît jusqu'à 1/e de la valeur initiale de l'amplitude. L'action des ultra-sons sur l'éprouvette utilisée a été analysée dans Bucur (1977, *op. cit.*), et les dimensions de l'objet mesuré ont été choisies de telle manière qu'aucune influence du passage des ultra-sons dans le bois ne se manifeste.

Les déterminations expérimentales ont été faites en technique d'impulsions avec l'appareil type Betonoscop N 2701 — transducteurs 50 KHz — pour essais non destructifs avec des ultra-sons.

Les éprouvettes de 30 cm × 2 cm × 2 cm ont été débitées dans du bois de lutherie ayant subi 10 ans de séchage ; les éprouvettes ont été chargées selon les trois axes anisotropiques avec des poids pour la charge statique et par chocs répétés appliqués avec un pendule Charpy pour la charge dynamique, à 0,2 R.

La vitesse et l'atténuation des ultra-sons ont été mesurées selon les trois axes (L, R, T) à des intervalles de 1 h, de 4 h, de 1 jour, de 2, 4, 8, 10, 12, 20, 48 et 52 jours pour les sollicitations statiques, et après cinquante, cent, deux cents... deux mille chocs pour les sollicitations dynamiques (avec une relaxation de 24 h après mille chocs). L'expérience a porté sur trois éprouvettes de chaque essence, pour chaque direction de sollicitation. Le nombre de mesures effectuées a donc été :

— pour les essais statiques de :

3 éprouvettes × 3 essences × 3 directions ×
× 6 paramètres (3 vitesses et 3 atténuations) × 12 modalités = 1 944

— pour les essais dynamiques de :

3 éprouvettes × 3 essences × 3 directions × 6 paramètres × 22 modalités = 2 564.

L'influence des sollicitations de longue durée sur les propriétés acoustiques a été étudiée en suivant l'évolution du comportement du bois exprimé par la vitesse d'une part, et l'atténuation d'autre part des ultra-sons en fonction de la durée de la charge, exprimée en jours pour les sollicitations statiques, ou en nombre de chocs pour les sollicitations dynamiques.

3.2. — Résultats

3.2.1. Sollicitations statiques.

Les résultats sont présentés dans le tableau 5. Il apparaît que la direction de

TABLEAU 5

La vitesse et l'atténuation des ultra-sons en fonction de la sollicitation statique

Ultrasonic velocity and attenuation in relation to statical loading

Temps	Epicéa			Sapin			Érable			
	Sollicitations selon les axes									
	L	R	T	L	R	T	L	R	T	
Vitesse (m/s)	V_L initial	6 150	↓ 6 300	↓ 6 200	↓ 5 980	↓ 6 000	↓ 6 050	↓ 4 800	↓ 4 350	↓ 4 400
	final	6 000	↓ 6 100	↓ 6 100	↓ 5 800	↓ 5 920	↓ 5 840	↓ 4 700	↓ 4 230	↓ 4 250
	V_R initial	2 340	↓ 1 940	↑ 2 100	↑ 1 680	↑ 1 720	↑ 1 700	↑ 2 380	↓ 2 360	↑ 2 170
	final	2 200	↓ 1 970	↑ 2 170	↑ 1 600	↑ 1 800	↑ 1 780	↑ 2 330	↓ 2 380	↑ 2 270
	V_T initial	1 500	↓ 1 470	↑ 1 470	↑ 1 160	↓ 1 300	↑ 1 200	↑ 1 680	↓ 1 550	↑ 1 520
	final	1 400	↓ 1 530	↑ 1 570	↑ 1 100	↓ 1 410	↑ 1 300	↑ 1 670	↓ 16 30	↑ 1 580
Atténuation (m^{-1})	α_L initial	0,48	↑ 0,50	↑ 0,45	↑ 0,57	↑ 0,60	↑ 0,59	↑ 1,26	↑ 1,20	↑ 1,30
	final	0,50	↑ 0,52	↑ 0,52	↑ 0,62	↑ 0,63	↑ 0,69	↑ 1,32	↑ 1,23	↑ 1,36
	α_R initial	1,6	↑ 1,75	↑ 1,8	↑ 1,4	↑ 2,0	↑ 1,9	↑ 2,70	↑ 2,73	↑ 2,70
	final	1,1	↑ 1,60	↓ 1,4	↓ 1,6	↓ 1,8	↓ 1,4	↓ 2,80	↑ 2,70	↓ 2,65
	α_T initial	2,4	↑ 2,80	↑ 3,5	↑ 3,9	↑ 3,0	↑ 3,6	↑ 3,20	↑ 3,83	↑ 3,50
	final	2,5	↑ 2,00	↓ 2,6	↓ 4,2	↑ 2,0	↓ 2,9	↓ 3,70	↑ 2,92	↓ 3,30

l'anisotropie selon laquelle la charge est appliquée est déterminante pour les modifications de la structure. Si la sollicitation suit la direction longitudinale, toutes les valeurs de la vitesse dans les trois directions sont diminuées de 0,6 à 6,6 p. 100.

Dans le cas de sollicitations radiales et tangentielles, seules les vitesses longitudinales sont diminuées, tandis que les vitesses radiales et tangentielles augmentent de 3 à 5 p. 100. L'atténuation des ultra-sons varie en sens inverse de la vitesse. D'autre part, à un certain moment de la sollicitation statique, en général après le 12^e jour, les propriétés acoustiques se stabilisent (fig. 2).

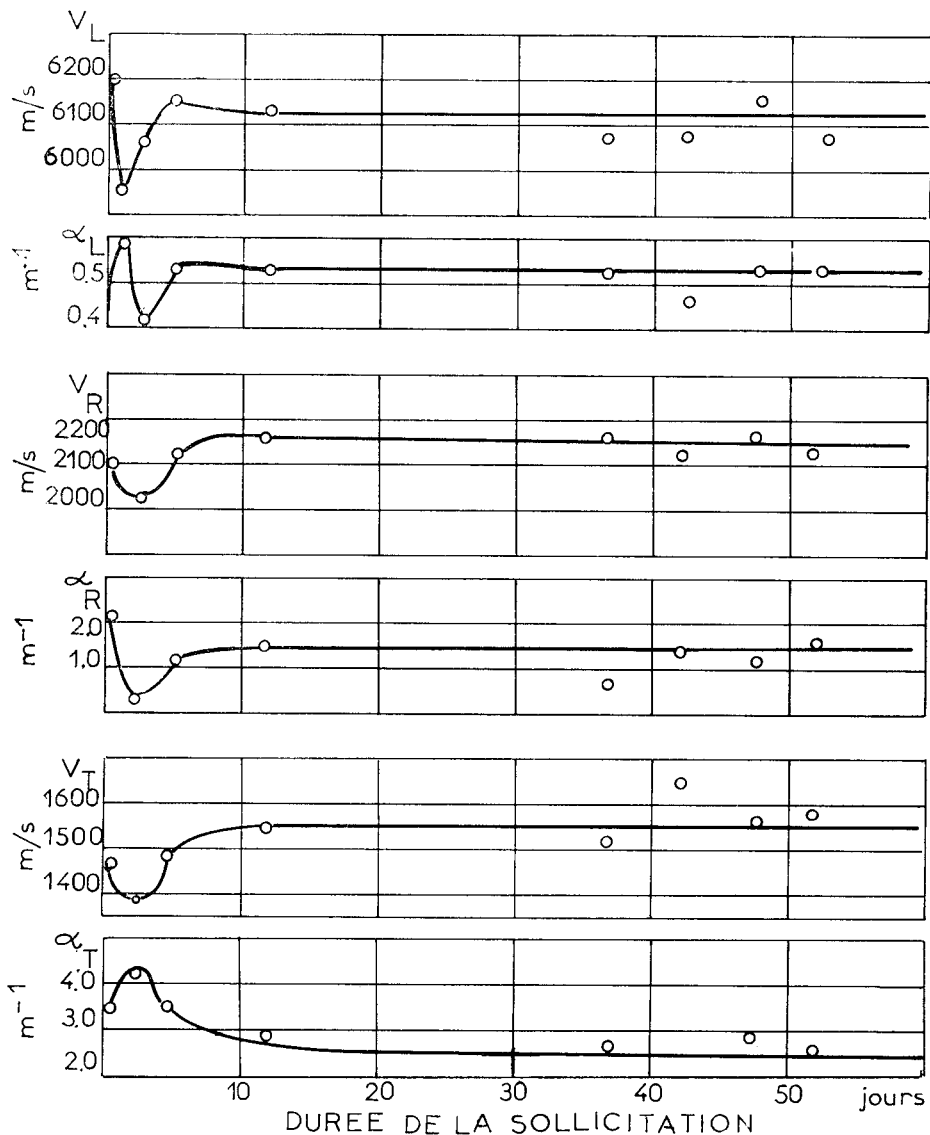


FIG. 2. — *Epicéa*. Sollicitation statique radiale. Variation de la vitesse et de l'atténuation des ultra-sons en fonction de la durée de sollicitation.

Spruce. Radial static loading. Relationship between ultrasonic velocity or attenuation and time of loading.

3.22. Sollicitations dynamiques.

L'influence des sollicitations dynamiques sur les propriétés acoustiques du bois est présentée, soit en diagrammes vitesse-nombre de chocs, soit en diagrammes atténuations-nombre de chocs (fig. 3).

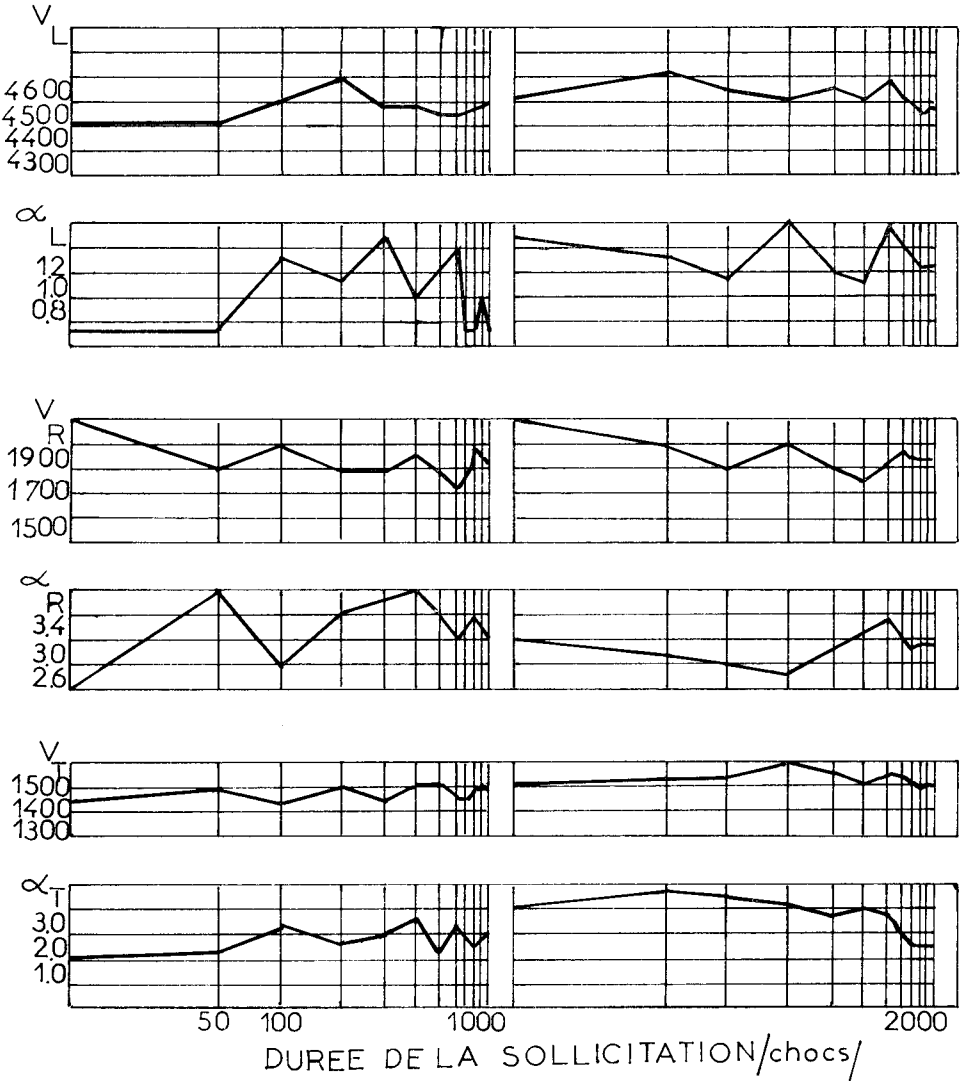


FIG. 3. — Erable ondé. Sollicitation dynamique tangentielle.
 Variation de la vitesse et de l'atténuation des ultra-sons en fonction du nombre de chocs.
 Curly maple. Tangential dynamical loading.
 Relationship between ultrasonic velocity or attenuation and number of shocks.

Les résultats des essais sont donnés dans le tableau 6.

Pour les sollicitations dynamiques de direction longitudinale, les valeurs de la vitesse longitudinale sont diminuées de 1 à 7 p. 100 pour le bois d'épicéa et de sapin,

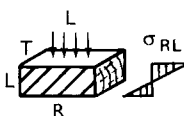
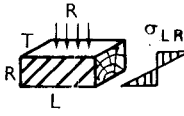
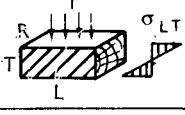
TABLEAU 6


La vitesse et l'atténuation des ultra-sons en fonction de la sollicitation dynamique
Ultrasonic velocity and attenuation in relation to dynamical loading

Temps	Epicéa			Sapin			Erable				
	Chocs selon les axes										
	L	R	T	L	R	T	L	R	T		
Vitesse (m/s)	V_L initial	6 000	6 180	6 080	5 870	5 900	5 900	4 800	4 830	4 530	↑
	final	5 930	6 000	6 000	5 700	5 800	5 800	4 200	4 750	5 600	↑
	V_R initial	1 560	1 460	1 390	1 330	1 580	1 600	2 200	1 890	1 990	↓
	final	1 460	1 520	1 450	1 430	1 670	1 670	2 110	1 850	1 850	↓
	V_T initial	1 260	1 260	1 260	1 100	1 100	1 210	1 350	1 510	1 440	↓
	final	1 230	1 340	1 360	1 080	1 190	1 290	1 200	1 470	1 600	↓
Atténuation (m^{-1})	α_L initial	0,58	0,58	0,63	0,50	0,50	0,59	0,8	0,78	0,70	↑
	final	0,76	1,02	0,70	0,57	0,57	0,88	1,5	1,12	1,26	↑
	α_R initial	2,65	2,1	2,3	2,65	3,18	2,84	2,70	2,74	2,76	↑
	final	3,06	4,3	2,8	4,15	4,60	3,00	3,20	6,74	3,10	↑
	α_T initial	5,4	5,5	4,7	5,0	4,96	4,1	2,0	3,0	2,0	↑
	final	5,5	4,9	2,4	5,6	4,3	3,3	6,0	3,8	2,67	↑

TABLEAU 7

La modification de la structure en fonction de la sollicitation
Structural modification in relation to loading

Sollicitation	Chargement de l'éprouvette	Sollicitations statiques									Sollicitations dynamiques								
		Epicéa			Sapin			Erable			Epicéa			Sapin			Erable		
		Modification de la structure selon l'axe																	
L	R	T	L	R	T	L	R	T	L	R	T	L	R	T	L	R	T		
Axiale		2	1	3	2	1	3	2	1	3	3	1	2	3	1	2	1	3	2
		plan RL			plan RL			plan RL			plan RT			plan RT			plan LT		
Radiale		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	3	2
		plan LR			plan LR			plan LR			plan LR			plan LR			plan LT		
Tangentielle		1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	2	3	1	2	3	2	1	3
		plan LT			plan LT			plan LT			plan LR			plan LR			plan RL		

 Plan de l'effort.

et de 13 p. 100 pour le bois d'érable au terme des deux mille chocs. Lorsque les chocs sont radiaux ou tangentiels, les différences entre le bois des conifères et le bois d'érable sont encore plus marquées. Enfin, on peut observer une tendance à la stabilisation des propriétés acoustiques, après mille huit cents chocs.

Cependant, les variations de vitesse et d'atténuation des ultra-sons au cours des essais ne peuvent être déterminés que par des modifications de la structure du bois. Des diagrammes en coordonnées $(V/V_0)^2$ -durée de la sollicitation ont été utilisés pour mettre en évidence l'évolution du processus de la modification de la structure liée à la diminution de la vitesse (fig. 4 et 5).

En fait, les données du tableau 7, sur lequel l'ordre 1, 2, 3 est l'ordre décroissant des réductions de vitesse en fin de sollicitation, et où les faibles différences correspondent donc à des fortes modifications de structure, montrent que :

— pour les sollicitations statiques, les modifications de la structure ont lieu dans le

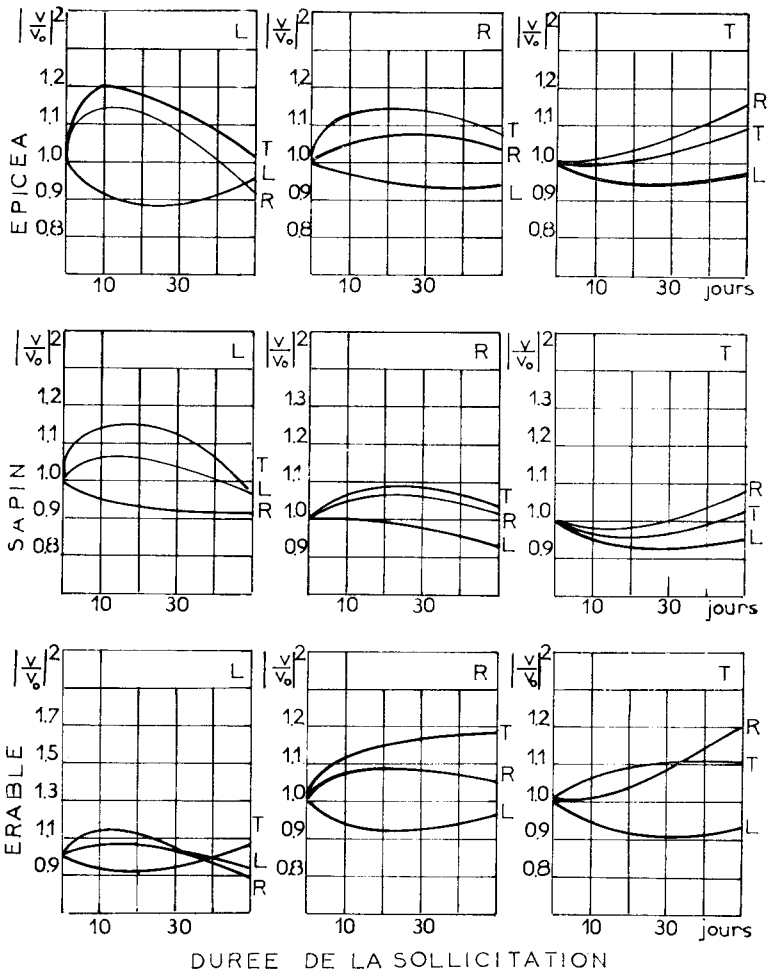


FIG. 4. — Variation du rapport $(V/V_0)^2$ en fonction de la durée de sollicitation statique.
Relationship between $(V/V_0)^2$ and time of static loading.

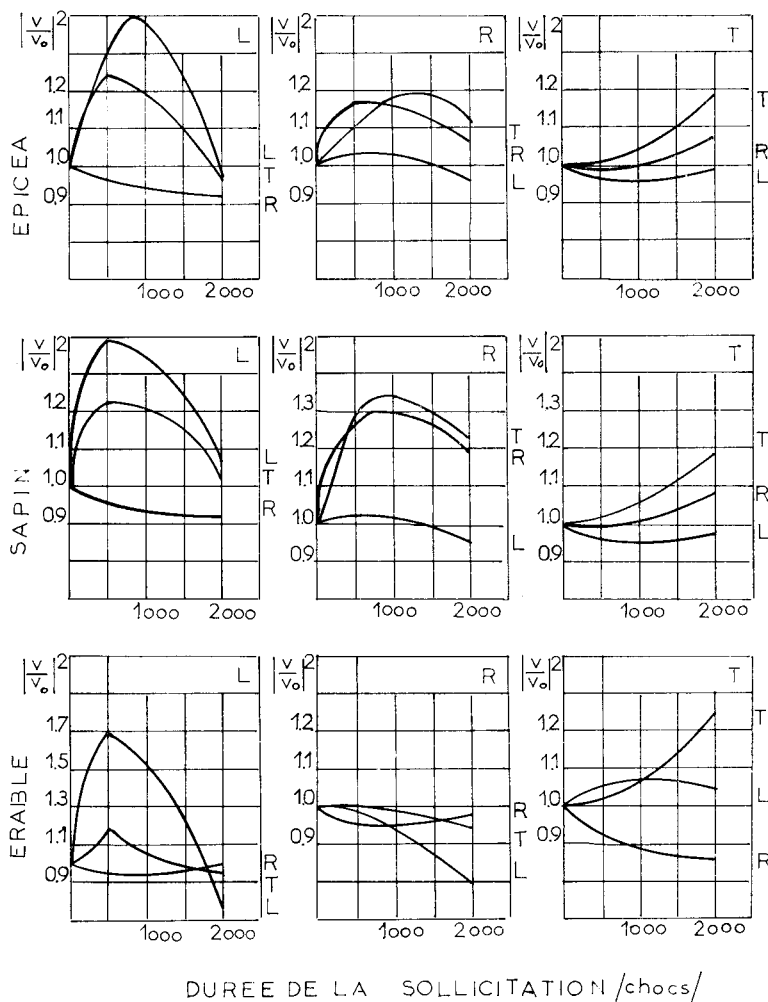


FIG. 5. — Variation du rapport $(V/V_0)^2$ en fonction du nombre de chocs au pendule Charpy.
 Relationship between $(V/V_0)^2$ and numbers of shocks on Charpy pendulum.

plan d'anisotropie où l'effort mécanique est développé, tandis que, pour les sollicitations dynamiques, les modifications sont observées en général dans le plan perpendiculaire (les exceptions concernant les sollicitations radiale pour l'épicéa et le sapin et axiale pour l'érable ondé).

Les rapports entre les constantes acoustiques mentionnées plus haut, à la fin de la sollicitation, sont donnés par les équations du tableau 8.

Enfin, l'allure des courbes des figures 4 et 5 montre la manière suivant laquelle les modifications passent par une série progressive de transformations caractéristiques pour chaque essence.

Il convient d'insister ici sur la fluctuation du timbre des violons neufs observée par Pasqualini-Briner (1950) qui peut aussi être attribuée à la modification de la structure du bois.

TABLEAU 8

Les équations de régression entre les vitesses et atténuations à la fin de la sollicitation statique et dynamique
 Regression equations between ultrasonic velocity attenuation at the end of statical and dynamical loading

Essence	Direction de la sollicitation	Equations de régression aux	
		Sollicitations statiques	Sollicitations dynamiques
Epicéa	Axiale	$V_R^1 = 0,021 + 0,405 V_L^1 - 0,211 V_T^1$ $\alpha_R^1 = 0,986 \alpha_L^1 + 0,166 \alpha_T^1$	$V_R^L = 0,032 + 0,335 V_R^L - 0,158 V_T^L$ $\alpha_R^L = 0,003 - 0,231 \alpha_L^L + 0,815 \alpha_T^L$
	Radiale	$V_R^r = 0,019 + 0,193 V_L^r + 0,517 V_T^r$ $\alpha_R^r = 0,001 + 3,060 \alpha_L^r + 0,010 \alpha_T^r$	$V_R^R = -0,007 + 0,141 V_L^R + 0,513 V_T^R$ $\alpha_R^R = 0,004 + 2,907 \alpha_L^R + 0,191 \alpha_T^R$
	Tangentielle	$V_R^t = 0,022 + 0,175 V_L^t + 0,549 V_T^t$ $\alpha_R^t = 1,391 \alpha_L^t + 0,320 \alpha_T^t$	$V_R^T = 0,003 + 0,142 V_L^T + 0,413 V_T^T$ $\alpha_R^T = 3,866 \alpha_L^T + 0,098 \alpha_T^T$
Sapin	Axiale	$V_L^1 = 0,016 + 0,400 V_L^1 - 0,195 V_T^1$ $\alpha_R^1 = 0,956 \alpha_L^1 + 0,159 \alpha_T^1$	$V_R^L = 0,029 + 0,297 V_L^L - 1,47 V_T^L$ $\alpha_R^L = 0,002 - 0,218 \alpha_L^L + 0,815 \alpha_T^L$
	Radiale	$V_R^r = 0,015 + 0,187 V_L^r + 0,512 V_T^r$ $\alpha_R^r = 0,001 + 3,470 \alpha_L^r + 0,005 \alpha_T^r$	$V_R^R = -0,007 + 0,137 V_L^R + 0,612 V_T^R$ $\alpha_R^R = 0,004 + 2,87 \alpha_L^R + 0,183 \alpha_T^R$
	Tangentielle	$V_R^t = 0,018 + 0,165 V_L^t + 0,498 V_T^t$ $\alpha_R^t = 1,251 \alpha_L^t + 0,319 \alpha_T^t$	$V_R^T = 0,003 + 0,131 V_L^T + 0,400 V_T^T$ $\alpha_R^T = 3,677 \alpha_L^T + 0,071 \alpha_T^T$
Erable ondé	Axiale	$V_R^1 = 0,204 + 0,298 V_L^1 + 0,965 V_T^1$ $\alpha_R^1 = 0,711 \alpha_L^1 + 0,105 \alpha_T^1$	
	Radiale	$V_R^r = 0,086 + 0,065 V_L^r + 1,211 V_T^r$ $\alpha_R^r = 1,470 \alpha_L^r + 0,168 \alpha_T^r$	$V_R^R = 0,110 + 0,321 V_L^R + 0,117 V_T^R$
	Tangentielle	$V_R^t = 0,031 + 0,177 V_L^t + 0,915 V_T^t$ $\alpha_R^t = 0,001 + 1,776 \alpha_L^t$	$V_R^T = 0,445 V_L^T - 0,146 V_T^T$

Par ailleurs, les résultats de ces expérimentations effectuées avec des ultra-sons concordent bien avec ceux de Kollmann(1960) qui a mis en évidence des changements de structure du bois par la méthode piézo-électrique en utilisant des éprouvettes essayées à la fatigue au pendule Charpy jusqu'à la rupture.

On a de même beaucoup parlé de l'importance de la table pour la qualité du violon. La tension des cordes donne une résultante sur le chevalet. Cette résultante appuie le chevalet sur la table selon l'axe tangentiel du bois. A ce genre de sollicitation, les données des tableaux 4 et 5 montrent que le bois de sapin et d'épicéa a un comportement presque identique ; cette constatation justifie donc l'utilisation du bois de sapin pour les violons de concert.

4. — Conclusion

Les quelques éléments que nous avons évoqués ici permettent de tirer un certain nombre de conclusions quant à l'intérêt des recherches acoustiques pour le bois en général, et pour la lutherie en particulier.

Le comportement du bois dans un champ vibratoire est défini par les constantes primaires, comme la vitesse de la propagation de l'onde et la friction interne donnée par le facteur de qualité de l'amortissement de la vibration, et aussi par des constantes dérivées, comme l'impédance et la radiation acoustique.

Comme méthode d'essais, on peut utiliser, soit la méthode de résonance, soit celle des ultra-sons.

La première impose aux éprouvettes une certaine forme (de type poutre) et ne permet la détection de la fréquence de résonance que dans une seule direction d'anisotropie, tandis que la méthode des ultra-sons est applicable sur n'importe quelle éprouvette et donne des informations sur le comportement du bois selon les trois axes.

Par ailleurs, pour mieux comprendre les phénomènes acoustiques, il est utile de corréliser les valeurs des constantes acoustiques avec des données sur la structure du bois.

Les problèmes posés par le vieillissement du bois sont aussi importants. Pour les étudier, on peut recourir à une simulation par sollicitations de longue durée qui, comme lui, influencent les propriétés acoustiques du bois de résonance. Il est probable que, dans le cas du bois de résonance utilisé en lutherie, le phénomène de fatigue, déterminé par le jeu de l'instrument, devient stationnaire à un certain moment, déterminé par le niveau de la sollicitation.

L'influence des sollicitations de longue durée statiques et dynamiques (semblables aux sollicitations normales de la caisse du violon) de niveau réduit (0,2 R) sur les propriétés acoustiques du bois d'épicéa, de sapin et d'érable ondé a été mise en lumière en suivant l'évolution du comportement du bois par les mesures de la vitesse et de l'atténuation des ultra-sons en fonction de la durée de la charge.

Des variations importantes des propriétés acoustiques sont observées au commencement du processus de simulation ; mais après une certaine durée, variable selon la nature de la charge, une nette stabilisation apparaît.

Ainsi, nous avons tenté de justifier la pratique empirique des facteurs d'instruments traditionnels et celle des musiciens, montrant par là que la fluctuation du timbre des violons neufs est particulièrement due aux sollicitations supportées à la suite d'un long usage qui pourraient entraîner des modifications de la structure très intime du bois.

Reçu pour publication en octobre 1979.

Summary

Resonance wood acoustical properties modified by long term loading

Modification of the acoustical properties of resonance wood of Spruce, Fir and curly Maple by long term loading at a low level of stress (20 p. 100 of modulus of rupture) was evidenced through the ultrasonic non destructive method.

The evolution of wood behaviour in the acoustical field is expressed by ultrasonic velocity and attenuation for different lengths of loading time.

The fluctuation of wood acoustical properties is attributed to very fine structural modifications.

Wood acoustical properties become stable after a certain loading duration depending on the nature of the charge.

The timbre fluctuation of new violines can also be partly explained by this phenomenon.

The behaviour of Spruce and Fir wood in the acoustical field is almost identical. This observation justifies the utilization of Fir wood in the manufacture of concert violins.

Références bibliographiques

- BARDUCCI I., PASQUALINI G., 1948. Mesura dell'attrito interno e delle costanti elastiche del legno. *Nuovo Cimento V*, n° 5, p. 416.
- BUCUR V., PASCU A., 1974. Longitudinal acoustical vibration in violin resonance wood. *2nd International Symposium in NDT of non-metallic materials RILEM*, vol. I, pp. 39-47.
- BUCUR V., 1977. Contribution à l'étude des influences de sollicitations statiques et dynamiques de longue durée sur les propriétés acoustiques du bois de résonance (en roumain). Thèse Université de Brasov, Roumanie.
- GHELMEZIU N., BELDIE I., 1970. On characteristics of resonance wood. *Bull. Inst. Politehnic Brasov, série B*, XII, 315-326.
- KEITH C. T., 1971. The anatomy of compression failure in relation to creep inducing stress. *Wood Science*, 4, n° 2, 71-82.
- KRZYSIK F., 1962. Untersuchungen über den Einfluss der Rohdichte auf die Verwendungsmöglichkeit von Fichtenklangholz. *Eberswalde, Symposium: Rohdichte von Holz und Holzwerkstoffen*.
- KOLLMANN F. A., 1960. Zeit und Festigkeit. Stuttgart, Holzcentralblatt Verlags.
- KOLLMANN F., COTE W., 1968. Principles of wood science. Vol. I, Solid wood. Springer Verlag, Berlin, London, New York.
- LEIPP E., 1965. Le violon. Paris, Hermann.
- LEONHARDT K., 1969. Geigenbau und Klaugfrage. Frankfurt/Main, Verlag Das Musikinstrument.
- MARK R., 1967. Cell wall mechanics of tracheids. New Haven, London, Yale University Press.
- MURPHY H., 1963. Cell-wall cristallinity as a function of tensile strain. *Forest Product Journal*, 13, n° 4, 151-155.
- PASQUALINI G., BRINER, 1950. Nota circa gli effetti del assorbimento ambientale sul suono dei violini antichi e moderni. Milano, Fratelli Bocca Editori.
- PICCIOLI L., 1927. I legnami. Torino, Unione Tipografica.
- SHELLENG J. C., 1969. Requirements for sounding board material. *The catgut Acoustical Society « News letters »*, n° 11, 18-22.
- ZENER C., 1940. Internal friction in solid. *Proc. of the Royal Society, A*, 52, n° 289, 152-166.
-