

Etudes chimiques et micro-structurelles des violons

C. Y. Barlow, chercheur, senior lecturer, University of Cambridge, Institute for Manufacturing, Royaume-Uni.

Les études expérimentales sur la fabrication des violons anciens associent un éventail de techniques de microscopie (microscopie optique, microscopie électronique à balayage) et d'analyses chimiques (analyse par rayons X). Les techniques de microscopie apportent des informations sur la structure et la nature du bois (par exemple l'espacement annuel des cernes peut être un indice de dommage ou d'altération biologique) ainsi que sur la nature des couches de surface et des revêtements. L'analyse chimique fournit également des données sur la nature des couches superficielles et des revêtements, et peut en outre déceler d'éventuels traitements chimiques du bois.

Que nous révèlent les résultats ?

Parmi les questions auxquelles nous souhaitons répondre figurent celles relatives aux techniques utilisées pour la facture des instruments, qui peuvent intéresser tant les luthiers que les conservateurs. Dans un domaine plus controversé, nous pouvons également tenter de mettre ces observations en corrélation avec la qualité du son des instruments.

Cette communication présente un certain nombre d'observations et examine leur pertinence au regard des pratiques actuelles.

I. Aperçu des techniques expérimentales

I. 1 Techniques de microscopie

La plus simple technique pour obtenir des informations sur les microstructures consiste à utiliser une lentille simple, loupe classique ou loupe de bijoutier. Ce grossissement, même s'il ne dépasse généralement pas 15 fois, suffit à renseigner sur la structure cellulaire du bois. Le cas le plus extrême de l'emploi d'une lentille simple est celui de van Leeuwenhoek, qui travaillait à Delft à la fin du XVII^e siècle et réussit à produire un grossissement d'environ 400 fois permettant d'observer pour la première fois certains détails d'organismes et de matériaux naturels. Un tel grossissement à l'aide d'une seule lentille reste toutefois l'exception, et pour les emplois courants, un assemblage de plusieurs lentilles sous forme de microscope optique s'impose. Ces microscopes fonctionnent en réflexion (révélant les structures de surface ou l'intérieur des structures transparentes) ou en transmission (généralement pour des coupes très minces de matériaux qui d'ordinaire ne sont pas transparents, tel le bois). Ces techniques peuvent fournir une analyse poussée susceptible de renseigner sur les structures cristallines et de donner des détails topographiques. La microscopie optique comporte cependant des limites, dans la

mesure où plus le grossissement est élevé, plus la profondeur de champ est réduite, de sorte que les échantillons très agrandis doivent être très plats et très lisses pour que des régions de taille appréciable puissent apparaître avec netteté. Le grossissement le plus élevé réalisable avec un microscope optique en champ clair est limité par le fait que la résolution n'est pas possible pour les éléments plus petits que la longueur d'onde de la lumière.

Pour des grossissements plus importants, un rayonnement à longueur d'onde plus courtes est nécessaire, ce qui peut être obtenu grâce à des électrons rapides qui ont été accélérés par des voltages élevés. La microscopie électronique la plus accessible est la Microscopie Electronique à Balayage (MEB). Un mince faisceau d'électrons balaye en trame l'échantillon. A chaque point, les électrons sont ou non réfléchis, et un signal approprié est généré. Puis une image agrandie est créée en convertissant le signal en image point à point sous forme de lumière sur un écran. La Microscopie Electronique en Transmission (MET) est, elle, beaucoup plus difficile à conduire expérimentalement (tant la préparation et l'examen de l'échantillon que l'interprétation de l'image sont délicats) ; par ailleurs, elle produit un grossissement et une résolution supérieurs.

Ces techniques sont présentées succinctement et comparées au Tableau 1.

Technique	Avantages	Limites
Microscopie optique	Accessible, peut être relativement peu onéreux. Information chromatique conservée, Certaines analyses cristallographiques sont possibles Résolution jusqu'à 0.2µm	Faible profondeur de champ
Microscopie électronique à balayage	Grande profondeur de champ Résolution jusqu'à 0.01µm Analyse chimique possible	Matériel coûteux Perte de l'information chromatique
Microscopie électronique en transmission	Résolution jusqu'à 0.001µm Analyse chimique à haute-résolution possible Analyse cristallographique (microstructurale) possible	Matériel très coûteux Perte de l'information chromatique Préparation de l'échantillon difficile Interprétation de l'image très difficile

Tableau 1: Comparaison des techniques de microscopie

1.2 Analyse chimique associée à la microscopie électronique

Un effet collatéral de la microscopie électronique (MEB ou MET) est la génération de rayons X caractéristiques des éléments présents dans l'échantillon. L'analyse des énergies ou longueurs d'onde de ces rayons X permet une analyse quantitative des éléments présents dans la région éclairée par les électrons. La technique, lorsqu'elle est appliquée à des échantillons réels avec la MEB, comporte toutefois des limites dont certaines peuvent être problématiques pour les échantillons de bois : en effet, si les échantillons ne sont pas parfaitement lisses, l'analyse ne peut pas être pleinement quantitative. Une autre limite est due au fait que les rayons X ne sont pas générés uniquement dans la région que le faisceau semble éclairer, mais également dans les régions voisines (généralement jusqu'à une taille d'un micron). Cela signifie que l'analyse d'une région de petite taille ou d'une seule particule est toujours entachée d'un doute. L'analyse MET ne comporte aucune de ces limites, et est généralement capable d'une plus grande précision.

II. La microscopie et l'analyse chimique appliquées à l'étude d'échantillons de violons : quelques exemples.

II.1 Sélection du bois

Lorsque les facteurs d'instruments sélectionnent leurs matériaux, leur choix est dicté par un certain nombre de paramètres. Pour nombre d'entre eux, l'essence du bois est déterminée par la convention : traditionnellement, les tables sont taillées dans de l'épicéa, les éclisses et le fond sont en érable. Quelle est la logique qui sous-tend ce choix? Les critères ne sont pas les mêmes pour la table et pour le fond. Le fond doit avant tout fournir un soutien mécanique pour les cordes, et ce avec une masse minimale. Ses propriétés vibratoires ont certes leur importance, mais pour le fond, de nombreux facteurs choisissent d'abord une essence en raison de son aspect.

La table remplit une fonction de premier plan puisqu'elle est la table d'harmonie et elle doit produire le meilleur volume sonore, ce qui exige de maximiser l'amplitude de vibration de la planche de bois. Sa résistance doit bien entendu être suffisante pour maintenir la stabilité structurelle, mais ici ce sont le module d'élasticité et l'amortissement acoustique du bois qui importent en premier lieu pour déterminer les performances des diverses essences. Pour conduire l'analyse [Barlow 1997], il convient d'abord de fixer la résistance minimale adéquate de la table puis (en utilisant la réponse vibratoire de la planche cintrée) de maximiser l'amplitude de vibration. Le meilleur bois selon ce critère est le balsa, mais son manque de résistance l'exclut par ailleurs. Ainsi, si l'on considère les deux critères - amplitude vibratoire et résistance - c'est l'épicéa qui constitue l'essence optimale.

Un facteur qui choisit un bois peut être influencé par l'aspect : la rectitude et la grosseur du grain sont des attributs évidents. Dans quelle mesure l'aspect du bois est-il révélateur de ses propriétés mécaniques et de son aptitude à donner un bon instrument de musique ? Même au sein d'une seule essence, les propriétés mécaniques peuvent varier grandement, notamment du point de vue du module élastique et de la résistance. Les propriétés sont déterminées par la structure cellulaire du bois ; la figure 1 montre la structure d'un échantillon caractéristique d'épicéa sur un cliché MEB. Les trachéides qui constituent l'essentiel du matériau traversent l'image en diagonale à partir du coin en bas à gauche ; l'épaisseur des

parois cellulaire diffère considérablement selon qu'il s'agit de cernes d'hiver ou de cernes d'été. Le module élastique et la résistance dans cette orientation semblent être fonction – de façon approximativement linéaire - de la densité du bois. L'anisotropie de la structure cellulaire signifie que les propriétés du bois varient fortement en fonction de l'orientation ; il est possible de modéliser ce comportement [Ashby & Gibson, 1988]. Les cellules des rayons constituent une proportion relativement faible du bois, mais puisqu'elles suivent normalement l'orientation forte des trachéides, elles ont également un impact significatif sur les propriétés mécaniques [Kahle & Woodhouse 1994].

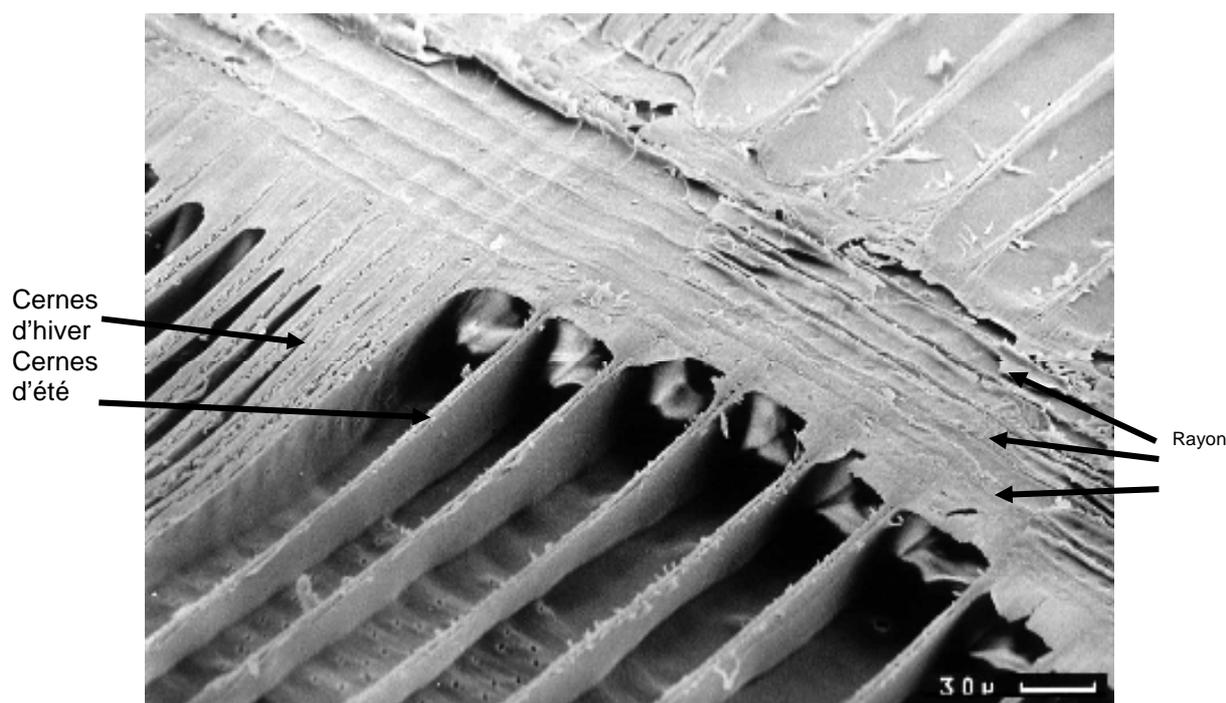


Figure 1. Structure des cellules d'épicéa : trachéides et cellules des rayons

II. 2 *Traitement du bois*

Plusieurs théories suggèrent que le bois des violons anciens aurait subi un trempage – ou un autre type de traitement - dans de l'eau (douce ou salée) ou dans des solutions chimiques. L'idée d'un traitement au borax, par exemple, est parfaitement sensée, car on sait que le borax tue la larve xylophage. Pour déceler les indices éventuels d'un tel traitement, il faut recourir à des analyses chimiques du bois.

Nous sommes là bien loin des techniques relativement simples de la microscopie électronique ; en effet, le principal élément du borax, à savoir le bore, a un numéro atomique de 5 et la sensibilité des techniques analytiques tend à faire défaut lorsqu'il s'agit de détecter les éléments situés à cette extrémité du tableau périodique. En outre, le bois renferme une quantité d'éléments (non seulement les composants « organiques », carbone, hydrogène, oxygène et azote, mais aussi des teneurs non négligeables en éléments minéraux et dérivés, dont l'aluminium, le calcium, le fer, le

magnésium, le manganèse, le sodium, le phosphore, le potassium, le silicium, le soufre et le zinc), de sorte que la détection exige que soient également mesurées les modifications de concentration, et non le simple ajout d'un seul élément. En outre, comme nous l'avons observé à propos du tableau 1, toute analyse de bois risque d'être compromise du fait de l'irrégularité de la surface.

Il existe toutefois une hypothèse qui peut être vérifiée, savoir si le bois a été immergé ou non dans de l'eau, ou maintenu très mouillé. Les immersions brèves étaient fréquentes puisque le moyen le plus simple de transporter les grumes était le flottage. L'immersion délibérée pratiquée sur des périodes de 4 à 12 semaines, appelée *ponding*, rend le bois perméable aux substances chimiques (par exemple l'imprégnation avec un agent de conservation), et lui confère davantage de stabilité pour des usages intensifs comme les mâts de navires [Rossell et al. 1973]. Le bois ainsi immergé est sujet aux attaques bactériennes, et les parties les plus molles de la structure ligneuse sont détruites, notamment les membranes des ponctuations aréolées des bois tendres qui font office d'alvéoles reliant les trachéides. Une douzaine d'échantillons d'épicéa provenant de violons anciens a été examinée pour voir si de telles attaques bactériennes s'étaient produites [Barlow & Woodhouse 1990 (a)] ; dans tous les cas (dont plusieurs échantillons d'instruments Stradivari) les disques membranaires centraux (qui peuvent sceller les alvéoles) étaient intacts. Un exemple est montré à la figure 2 provenant d'un instrument de Maggini de 1610. Ici,

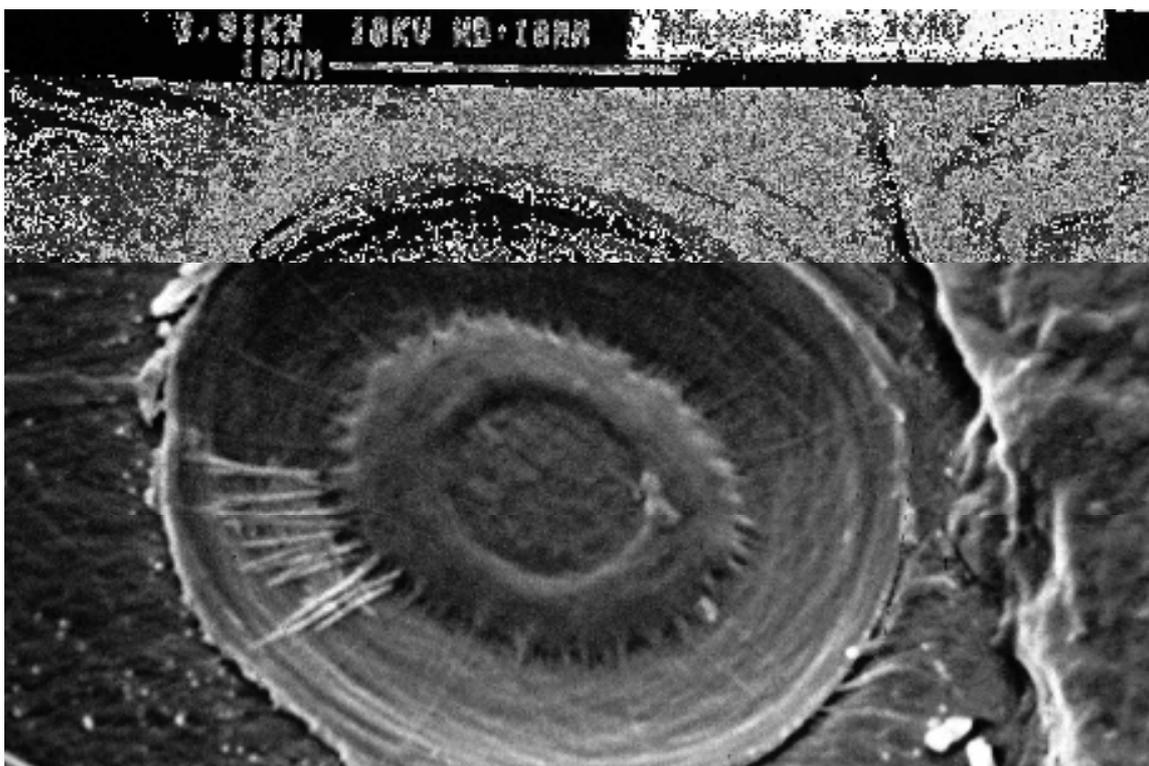


Figure 2. SEM picture of bordered pit in spruce from violin by Maggini.

non seulement les membranes centrales sont intactes, mais le margo (le réseau de filaments qui sous-tend les membranes), est visible. Il convient de noter que malgré l'absence d'indices d'immersion de type *ponding*, des concentrations très élevées de chlore et de sodium ont été trouvées dans un échantillon de bois provenant d'un

violon de Santo Serafin, qui travaillait à Venise. Il semblerait qu'une partie de ce bois ait été immergée dans la mer, et il est possible que cette immersion ait été délibérée même si Serafin ne souhaitait pas obtenir un bois dans cet état. Le comte Cozio di Salabue écrit à l'époque : « A Venise, on peut généralement acheter du bon bois coupé provenant d'Istrie, mais assurez-vous de le prendre avant qu'il ait été transporté à l'Arsenal et immergé dans l'eau de mer pour le renforcer et tuer les larves » [Dipper & Woodrow 1987]

II. 3 Les techniques de facture – cintrage

La question de savoir si les planches des violons de l'Âge d'Or étaient cintrées ou creusées fait l'objet d'un débat récurrent. Plusieurs arguments parlent en faveur du cintrage : si la planche est creusée, les lignes du grain sont coupées, ce qui risque d'amoindrir la résistance du matériau. En outre, les planches de certains violons anciens sont d'une épaisseur très uniforme, ce qui peut être obtenu naturellement en cintrant des planches plates pour leur donner la forme souhaitée.

Pour qu'une planche puisse être cintrée en une forme donnée, le bois doit devenir d'une certaine façon « plastique » pour acquérir une forme nouvelle, puis conserver cette forme durablement une fois que la contrainte est enlevée. Cette opération peut se faire par chauffage, avec ou sans mouillage du matériau. Pour cintrer les éclisses des violons, par exemple, il suffit généralement de les chauffer au fer à cintrer (même s'il est logique de s'assurer que le bois n'est pas trop sec avant l'opération) ; pour les meubles, le bois est souvent assoupli à la vapeur. La question de savoir comment le bois réagit au cintrage et s'il est endommagé au cours de ce processus mérite d'être posée. Pour examiner ce point, du bois a été assoupli de deux façons différentes : à la vapeur et à l'ammoniaque. Contrairement à la vapeur et à l'eau qui n'ont aucun effet durable sur les matériaux, l'ammoniaque se combine à la cellulose et influe de façon permanente sur les propriétés mécaniques du bois. Lorsqu'il est imprégné avec de l'ammoniaque (présent dans le crottin de cheval et facile à se procurer à l'époque pour les facteurs), le bois devient dans un premier temps mou et malléable, et peut être mis en forme sans être chauffé. Au séchage, il devient très dur et le module d'élasticité augmente [Barlow & Woodhouse 1992 ; Barlow & Woodhouse 1993]. Mais si le bois est à la fois chauffé et traité à l'ammoniaque, il montre des signes d'endommagement au cintrage.

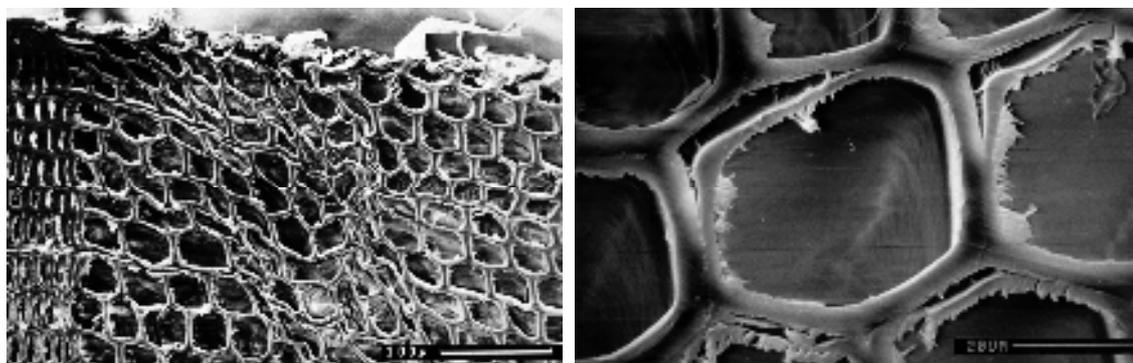


Figure 3. Epicéa assoupli avec l'ammoniaque, puis cintré. (a) déformation cellulaire macroscopique, particulièrement dans les cernes d'été. (b) Défaillance des trachéides le long de la lamelle centrale

L'épicéa de la figure 3 a été assoupli à l'ammoniaque puis cintré ; les cellules des cernes d'été sont fortement déformées. On peut voir sur la figure.3b que les trachéides se détachent le long de leur ligne centrale. Cela provoquera une réduction de la résistance et du module d'élasticité (en particulier dans l'orientation transversale).

II.4 Vernissage et finitions de surface

L'influence éventuelle du vernis sur la sonorité et sur les qualités de jeu des violons fait depuis des années l'objet d'une abondante réflexion. Un violon à peine construit joué « en blanc » avant vernissage est généralement perçu comme ayant une sonorité différente de celle d'un instrument fini. Cette différence est toutefois difficile à évaluer correctement : il est notoire que les tests d'écoute sont très délicats à conduire. Lors d'une expérience plus simple [Barlow & Woodhouse 1990 (b)] les échantillons de bois ont été préparés comme pour la facture d'un violon, puis vernis avec différents types de revêtements, dont un vernis à l'alcool et un vernis à l'huile. Même ainsi, l'interprétation des résultats n'était pas simple, mais il ressortait au moins une conclusion claire, à savoir qu'un vernis, de quelque nature qu'il soit, augmente sensiblement le facteur d'amortissement des échantillons. L'oreille décèle avec une grande sensibilité les différences d'amortissement dans les sons de tapotement de la planche, ce qui concorde avec les changements minimes mais décelables qui ont été rapportés dans la littérature [Schelleng 1968].

Puisqu'il apparaît que le vernis a un effet sur la sonorité d'un violon, il est donc très important de pouvoir contrôler la profondeur à laquelle le vernis pénétrera dans le bois. La profondeur de pénétration peut également influencer l'aspect de l'instrument, notamment lorsqu'un vernis teinté est appliqué. Avec l'érable, par exemple, un vernis qui pénètre dans les vaisseaux produira des mouchetures très colorées qui sont considérées comme indésirables. Les vaisseaux sont clairement visibles sur le cliché MEB d'un échantillon d'érable (découpé au scalpel) de la figure 4. Les vaisseaux sont les formes ovales qui apparaissent sur le cliché du haut (grossissement plus faible) ; le cliché du bas montre des trachéides (qui constituent l'essentiel de la structure) et un rayon.

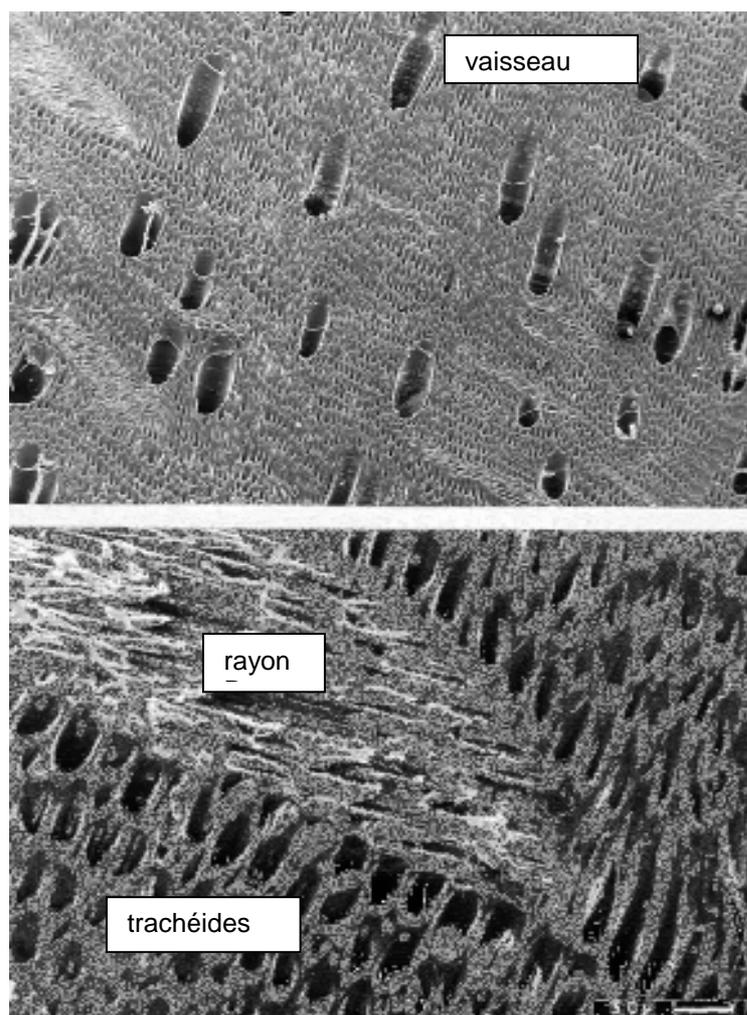


Figure 4. Découpes d'érable montrant les vaisseaux, rayons et trachéides

Afin d'empêcher le vernis de pénétrer dans le bois, il faut appliquer une couche intermédiaire qui fasse office de barrière. Les critères auxquels cette couche doit répondre ont été étudiés lors d'expérience conduites sur des échantillons contemporains dont les résultats ont été comparés à l'examen d'échantillons prélevés sur des instruments historiques. Cette expérience a été menée dans le cadre d'une étude plus générale de la nature des revêtements de base sur les violons anciens [Barlow & Woodhouse 1987]. Dans certains échantillons, des « sous-couches » riches en éléments minéraux ont été trouvées entre le bois et le vernis. L'une des fonctions de ces couches de base semble avoir été de faire obstacle à la pénétration du vernis dans le bois.

Un exemple de ceci est montré à la figure 5. La figure 5a montre un « bouchon » qui empêche le vernis de pénétrer dans un vaisseau, sur un violon de Niccolò Amati (1660). Cet effet a été reproduit sur l'échantillon expérimental montré à la figure 5b, où une couche très fine de cendre de pouzzolane finement moulue a été employée comme couche tampon. La pouzzolane a été appliquée sous forme de boue aqueuse puis laissée sécher. La surface du bois était à ce stade totalement occultée par la poudre de pouzzolane. Une huile de résine a ensuite été passée au pinceau

sur la surface, dont l'indice de réfraction était assez proche de celui de la pouzzolane pour rendre celle-ci invisible à l'œil nu. Une fine couche de vernis a ensuite été

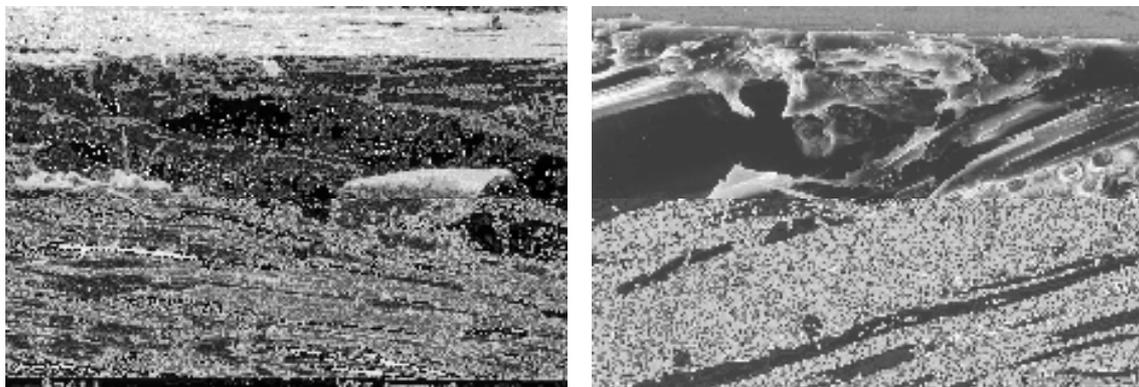


Figure 5a. Sur cet échantillon d'un violon de Niccolò Amati, le vaisseau a été « bouché » de sorte que le vernis ne peut pas pénétrer. Les petites sphères sont des spores fongiques qui se développaient activement dans le bois.

Figure 5b. Vaisseau d'un échantillon expérimental qui a été bouché avec une fine couche de cendre de pouzzolane mélangée à de l'huile de résine.

appliquée par-dessus le tout. Sur la figure 5b, la présence de la couche de pouzzolane est indécidable. De même, sur la fig. 5a, il n'existe aucun signe visible de la présence d'une couche tampon de pouzzolane, mais cette étude démontre précisément qu'il peut exister une couche minérale, même si elle n'est pas visible. Sur d'autres instruments (voir figure 6), des couches beaucoup plus épaisses ont été notées, dont la fonction comme barrière est claire, mais il apparaît désormais que même une couche très fine peut remplir cette fonction.

Au cours de ces recherches, la nature et la fonction des sous-couches minérales ont été étudiées sur divers instruments historiques. L'une des questions qui appellent une réponse est celle de leur composition chimique, laquelle a été analysée en concomitance avec l'imagerie MEB. Les résultats ont démontré qu'une vaste gamme de matériaux était employée, de sorte qu'il n'existe pas un « ingrédient magique ». Même les échantillons d'instruments Stradivari construits à des dates différentes montrent des compositions chimiques très variées bien que les sous-couches présentent un aspect fort semblable. L'échantillon montré à la figure 6 contient presque 40% d'aluminium, 23% de soufre et 15% de silicium, alors qu'un échantillon d'un autre instrument Stradivari contenait entre 10% et 20% d'aluminium, de silicium, de soufre, de chlore et calcium et de fer.

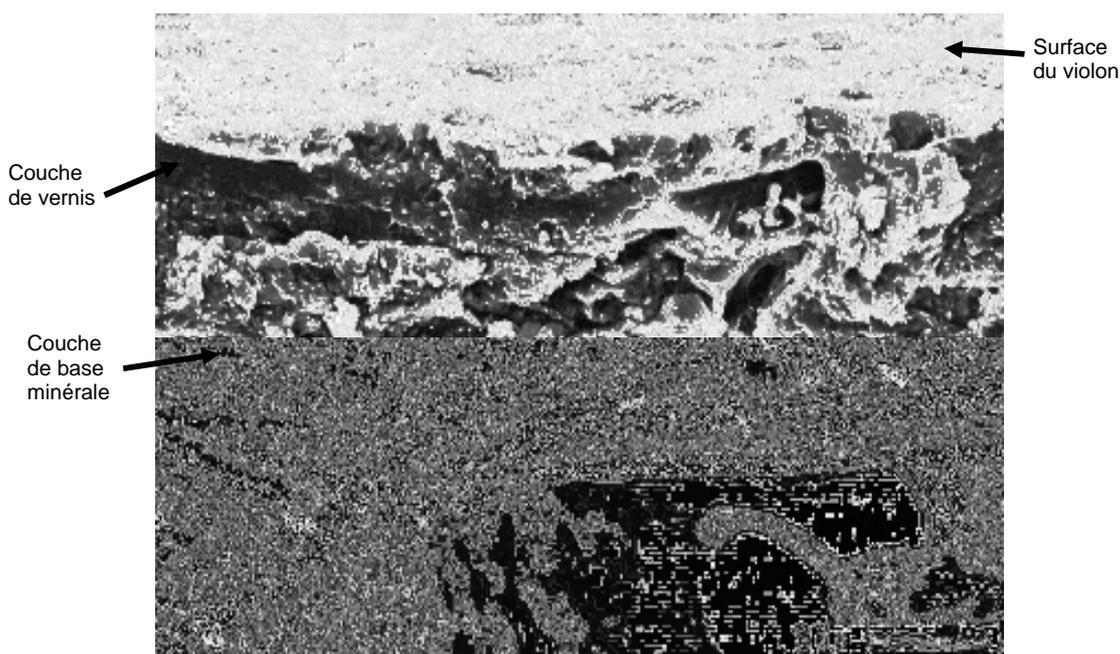


Figure 6. Cliché MEB montrant une coupe transversale de la couche de base minérale sur un violon Stradivari.

III Conclusions

Nous avons illustré quelques exemples d'étude et d'analyse du bois et de la surface des violons grâce à l'utilisation des techniques de la chimie et de la microscopie. Ces recherches ont permis de mieux comprendre ce qui était pratiqué - et ce qui ne l'était pas - par les luthiers européens Europe aux XVII^e et XVIII^e siècles. Certains de ces résultats ont pu être également utiles à des facteurs contemporains qui tentent aujourd'hui de reproduire des techniques de facture ancienne.

IV Références bibliographiques

- Ashby, M.F., et Gibson L.J. *Cellular Solids*, Pergamon, Oxford, 1988.
- Barlow, C.Y. « Materials selection for musical instruments », *Proceedings Institute of Acoustics*, vol 19 pt 5, 1997, pp 69-78.
- Barlow, C.Y. et Woodhouse, J., « Of old wood and varnish: peering into the can of worms », *J. Catgut Acoustical Society Series II*, vol 1 no. 4, 1989, pp 2-9.
- Barlow, C.Y. et Woodhouse, J., « Bordered pits in spruce from old Italian violins », *Journal of Microscopy* vol 160, 1990 (a), pp 203–211. □
- Barlow, C.Y. et Woodhouse, J., « The influence of varnish on the properties of spruce plates », *Proceedings Institute of Acoustics*, vol. 12 pt 1, 1990(b), pp765-770.
- Barlow, C.Y. et Woodhouse, J., « Micromechanics of permanent deformation in softwood », *Proc. 13th Risø Symposium on Materials Science*, 1992, pp 213–219.

Barlow, C.Y. et Woodhouse, J., « Microstructures and properties of bent spruce », *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference*, Publication de l'Académie Royale de Musique de Suède, no. 79, pp 346-350, 1993.

Dipper, A. et Woodrow, D., *Count Ignazio Alessandro Cozio di Salabue*. Taynton Press, Oxfordshire, Royaume Uni, 1987.

Kahle, E. et Woodhouse, J., « The influence of cell geometry on the elasticity of softwood », *J. Mater. Sci.*, vol. 29, 1994, pp 1250–1259.

Rossell S.E. *et al.*, « Bacteria and wood: a review of the literature relating to the presence, action and interaction of bacteria in wood », *J. Inst. Wood Sci.*, vol. 6, 1973, pp 28-35.

Schelleng, J. C, « Acoustical effects of violin varnish », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 44 , 1968, p 1175.

Biographie

Claire Barlow, chercheur, senior lecturer, Université de Cambridge, Royaume-Uni
Senior lecturer au département « Engineering » de l'Université de Cambridge, Claire Barlow est spécialisée dans les relations entre *microstructures*, propriétés mécaniques et traitements appliqués d'une grande variété de matériaux. Elle a entrepris un certain nombre d'études d'expertise sur des violons anciens, s'intéressant à la « couche de préparation » ou « fond de bois » et aux aspects des traitements du bois utilisant l'analyse par microscope électronique à balayage. Sa motivation première a été de comprendre les objectifs des maîtres du passé dans leur pratique et de rendre ces informations accessibles aux facteurs d'aujourd'hui.