

Influence du réglage d'un archet de violon sur ses propriétés mécaniques

Frédéric Ablitzer¹, Jean-Pierre Dalmont¹, Nicolas Dauchez²¹ Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine (LAUM) UMR CNRS 6613 – Le Mans, France – frederic.ablitzer.etu@univ-lemans.fr² Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Mécaniques et des Matériaux (LISMMA) – Saint-Ouen, France

Le réglage d'un archet de violon modifie certaines de ses caractéristiques mécaniques, avec des conséquences sur ses qualités de jeu. L'objectif de ce travail est de comprendre l'influence des paramètres de réglage sur les propriétés de l'archet en statique. Un modèle par éléments finis a été développé : il prend en compte la non-linéarité géométrique et la précontrainte exercée par la tension du crin. Ce modèle permet de calculer les souplesses verticale et latérale. Il est validé expérimentalement après recalage par rapport à un archet de référence. Finalement, les réglages que peuvent faire un archetier, tels que la modification de la courbure de la baguette ou de la tension du crin, sont simulés. Leurs conséquences sur les caractéristiques mécaniques sont établies. Les perspectives de ce travail sont de relier ces caractéristiques à la perception du musicien quant à la qualité de l'archet.

1 Introduction

Les propriétés mécaniques d'un archet de violon (fig. 1) sont en partie déterminées par les réglages effectués par l'archetier, par exemple la courbure de la baguette, et par le musicien, qui ajuste lui-même la tension de mèche. Les qualités de jeu pouvant être fortement liées à certaines propriétés mécaniques, il importe de comprendre comment le réglage d'un archet les modifie. Le travail présenté porte sur les propriétés de l'archet en statique. Dans une première partie, un modèle d'archet incluant la baguette et la mèche sous tension est présenté. Ce modèle permet de prédire la forme de la baguette après mise sous tension du crin et d'étudier le comportement en statique de l'archet lorsqu'une force est exercée en un point de la mèche. Une deuxième partie présente des mesures effectuées sur un archet afin de fournir des paramètres d'entrée du modèle. Dans la dernière partie, le modèle est utilisé après recalage pour évaluer l'influence de la tension du crin sur les raideurs verticale et latérale.

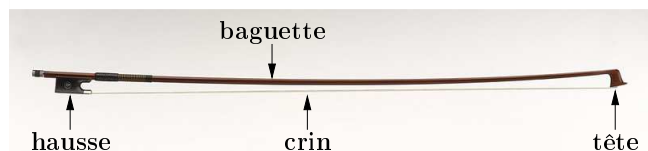


FIG. 1: Archet de violon.

2 Modèle d'archet

2.1 Modélisation de la baguette

La baguette est modélisée par des éléments finis de poutre. Le matériau est supposé élastique et isotrope. La baguette est encastée au niveau du point d'attache à la hausse. À l'autre extrémité, les efforts appliqués sur

la tête correspondent à la force de tension du crin \mathbf{T} , dont on note T_x et T_y les composantes dans un repère lié à la direction hausse-tête. Lorsque l'archet est mis sous tension depuis l'état initial (fig. 2, a), la tension \mathbf{T}_0 est portée par la direction hausse-tête (fig. 2, b). Lorsqu'une force \mathbf{F} est ensuite appliquée sur le crin, la tension est portée par la direction du crin entre le point d'application de \mathbf{F} et la tête (fig. 2, c).

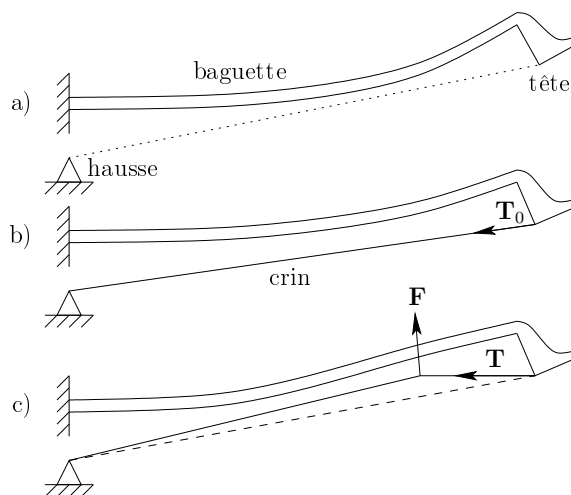


FIG. 2: Archet au repos (a), sous tension (b) et soumis à une force sur le crin (c).

Le calcul de la déformée de la baguette soumise à une tension T est un problème géométriquement non-linéaire. En effet, le moment de flexion le long de l'archet dépend de la distance crin-baguette, qui augmente avec la tension. Ainsi, une même augmentation de tension provoque un changement de courbure d'autant plus grand que la tension est élevée. Le modèle par éléments finis prend en compte cette non-linéarité en calculant la déformée de façon itérative.

2.2 Modélisation de la mèche

La mèche est assimilée à un crin unique tendu entre la hausse et la tête. Lorsqu'une force \mathbf{F} de composante verticale F_y connue est appliquée à l'abscisse relative γ ($0 < 1 < \gamma$), on suppose que le crin prend la forme d'un triangle dont chaque côté s'allonge de façon élastique, proportionnellement à la variation de tension (fig. 3).

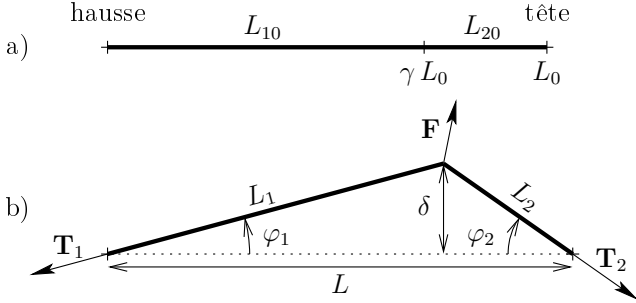


FIG. 3: Modélisation de la mèche.

La tension étant supposée égale de part et d'autre du point d'application de la force, c'est-à-dire $T = \|\mathbf{T}_1\| = \|\mathbf{T}_2\| = \sqrt{T_x + T_y}$, les longueurs des côtés du triangle sont données par :

$$\begin{cases} L_1 = \gamma L_0 (1 + s_h (T - T_0)) \\ L_2 = (1 - \gamma) L_0 (1 + s_h (T - T_0)) \end{cases} \quad (1)$$

où s_h désigne la souplesse linéique du crin. Au point d'application de la force \mathbf{F} , la déflexion du crin est :

$$\delta = L_2 \frac{T_y}{T}, \quad (2)$$

et la distance L entre la hausse et la tête est :

$$L = \sqrt{L_1^2 - \delta^2} + \sqrt{L_2^2 - \delta^2}. \quad (3)$$

L'équilibre statique du crin,

$$\mathbf{T}_1 + \mathbf{F} + \mathbf{T}_2 = \mathbf{0}, \quad (4)$$

fournit deux équations :

$$\begin{cases} F_x = T (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \\ F_y = T (\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2) \end{cases} \quad (5)$$

En combinant cette deuxième équation avec des relations géométriques, on obtient :

$$T_y = \gamma F_y. \quad (6)$$

2.3 Archet assemblé

Lorsque la force de tension du crin \mathbf{T} est appliquée à la tête dans le modèle par éléments finis, la distance entre les points d'attache du crin à la hausse et à la tête varie. Une augmentation de la composante longitudinale T_x rapproche ces points tandis qu'une augmentation de la composante verticale T_y les éloigne. La présence du crin s'oppose à ces déplacements, ce qui se traduit par une relation supplémentaire liant la distance hausse-tête aux composantes T_x et T_y .

Connaissant la composante verticale F_y de la force exercée à l'abscisse relative γ , la composante T_y est fixée

par l'équation (6). Le problème revient à trouver la composante T_x pour laquelle la distance hausse-tête calculée par le modèle éléments finis de la baguette, notée \tilde{L} , est égale à la longueur L représentée sur la figure 3 et calculée par l'équation (6). La résolution est implémentée numériquement comme un problème de minimisation d'une fonction $f(T_x) = |L - \tilde{L}|$.

3 Mesures

Afin de confronter le modèle à l'expérience, les simulations sont effectuées à partir de paramètres mesurés sur un archet. L'archet utilisé est en Boco, de module d'Young $E = 34.5$ GPa mesuré sur la baguette au moyen d'un outil d'aide à la facture instrumentale [1]. La baguette est de section elliptique. En raison du faible écart entre les diamètres verticaux et horizontaux, on fait l'approximation d'une section ronde. Celle-ci est définie par un polynôme d'ordre 4 approchant les diamètres mesurés (fig. 4).

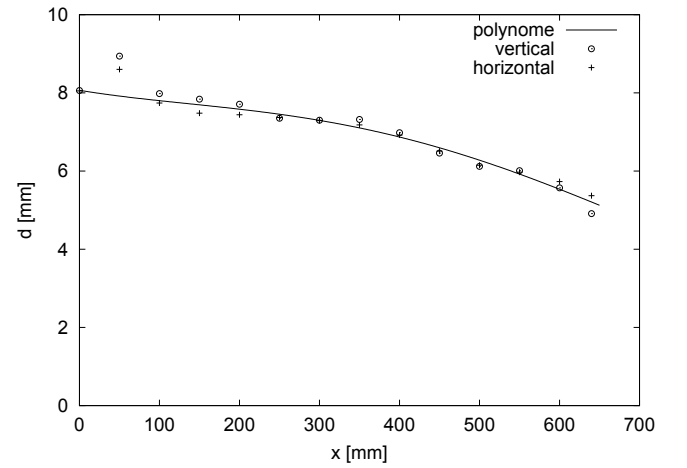


FIG. 4: Diamètres verticaux et horizontaux le long de la baguette et approximation polynomiale.

La forme initiale de la baguette est obtenue à partir des contours supérieurs et inférieurs extraits d'une photo et approximés par des polynômes d'ordre 5, dont la demi-somme fournit la ligne moyenne (fig. 5). La forme de la baguette sous tension est mesurée de la même façon.

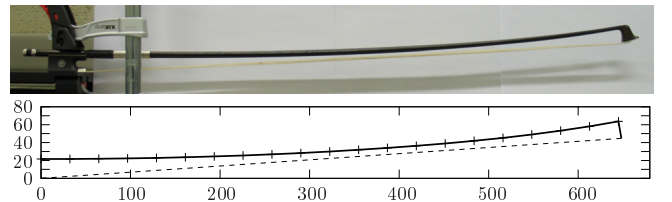


FIG. 5: Photo de l'archet non tendu et ligne moyenne obtenue à partir des contours de la baguette.

Le recalage du modèle nécessite la connaissance de la tension du crin T_0 . Celle-ci est estimée au moyen d'un capteur de force placé entre le bouton et l'extrémité de la baguette (fig. 6). Ce capteur délivre une tension proportionnelle à la force mesurée. La force mesurée correspond à la force de tension du crin \mathbf{T} à laquelle s'ajoutent des

forces de frottement f entre la hausse et la baguette, dont la valeur et le sens sont a priori inconnus (fig. 7).

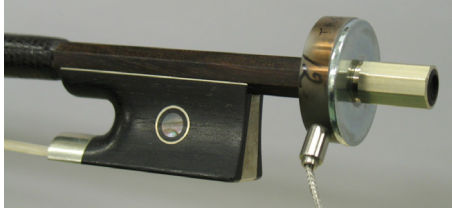


FIG. 6: Capteur de force monté sur l'archet.

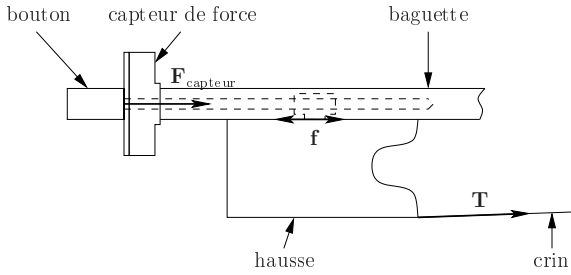


FIG. 7: Principe de la mesure de tension du crin.

Ces forces de frottement peuvent être mises en évidence en observant le signal temporel délivré par le capteur lorsque la hausse est écartée manuellement de sa position d'équilibre dans un sens et dans l'autre (fig. 8). Ce déplacement relatif entre la hausse et la baguette est effectué sans tourner le bouton. Quand la hausse est avancée, la force mesurée par le capteur augmente (pics supérieurs) puis retombe à une valeur constante $F_{\text{capteur}}^+ = T + f^+$. Quand la hausse est reculée, la force diminue (pics inférieurs) puis remonte vers une autre valeur constante $F_{\text{capteur}}^- = T - f^-$. En faisant l'hypothèse qu'à ces deux paliers correspondent les limites de frottement statique et que celles-ci sont les mêmes quel que soit le sens, *i.e.* $f^+ = f^-$, la force de tension estimée est :

$$T = \frac{1}{2}(F_{\text{capteur}}^+ + F_{\text{capteur}}^-) . \quad (7)$$

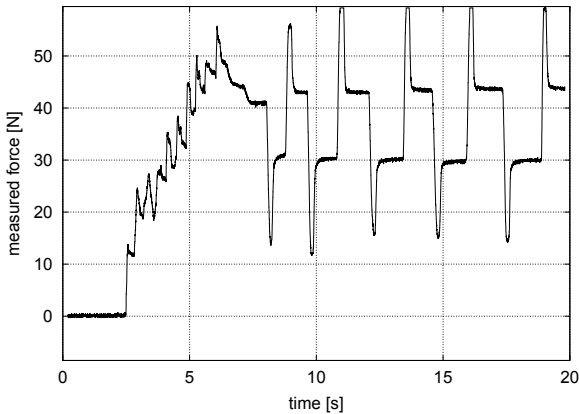


FIG. 8: Force mesurée par le capteur à la mise sous tension de l'archet puis lorsque la hausse est déplacée alternativement d'avant en arrière.

4 Résultats

4.1 Comparaison modèle/expérience

La comparaison entre la déformée de l'archet sous tension obtenue par simulation et celle observée en pratique est un premier indicateur de la pertinence du modèle. La simulation a été effectuée avec la tension mesurée sur l'archet, $T_0 = 36.6$ N. L'écart constaté entre la déformée calculée par le modèle et celle mesurée a été minimisé en augmentant de 12 % le module d'Young mesuré sur la baguette, c'est-à-dire $E = 38.6$ GPa. À noter que l'incertitude sur la tension du crin mesurée, estimée à moins de 2 % dans le cadre des hypothèses formulées pour la mesure, peut contribuer partiellement à cet écart. La figure 9 montre les résultats obtenus en corrigeant le module d'Young.

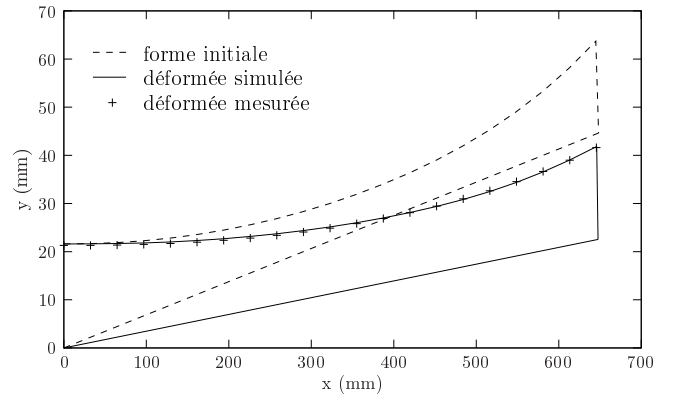


FIG. 9: Comparaison entre la déformée calculée par le modèle et celle mesurée, après correction du module d'Young.

Dans un second temps, un recalage du modèle a été effectué à partir de la raideur verticale le long de la baguette. Pour une valeur de la souplesse linéique du crin $s_h = 2 \cdot 10^{-4}$ (mm/N).mm⁻¹, une bonne concordance a été obtenue entre la raideur donnée par le modèle et la raideur expérimentale (fig. 10). Cette dernière a été obtenue en mesurant le déplacement engendré par une force verticale d'environ 1 N à différentes abscisses de la mèche. La force imposée dans le modèle vaut $F_y = 1$ N. L'ordre de grandeur trouvé pour la souplesse linéique est cohérent avec les observations d'Askenfelt sur les propriétés de la mèche [2].

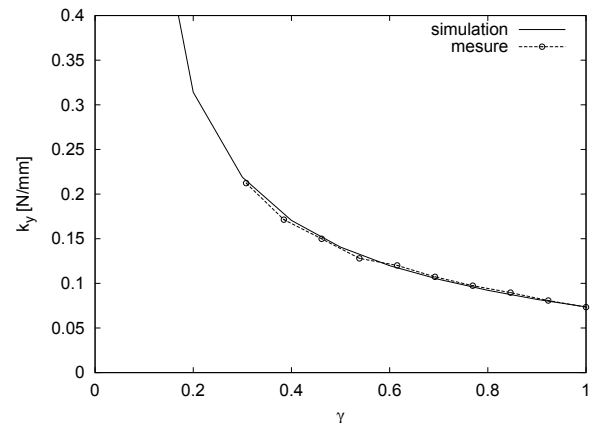


FIG. 10: Raideur verticale le long de l'archet.

4.2 Utilisation du modèle

Le violoniste étant souvent amené à incliner l'archet lors du jeu, la force exercée par l'archet sur le crin n'est pas systématiquement verticale par rapport au repère lié à l'archet. On évalue ici à l'aide du modèle la raideur le long de la baguette en fonction de l'inclinaison de l'archet, ainsi que l'effet d'une augmentation de la tension de jeu. Des simulations sont effectuées en faisant varier l'angle d'inclinaison ψ de la force \mathbf{F} par rapport au plan vertical de l'archet. Un angle $\psi = 0^\circ$ correspond à une force verticale et $\psi = 90^\circ$ à une force latérale. En situation de jeu, cet angle caractérise l'inclinaison de l'archet par rapport à la corde. Les résultats obtenus sont présentés sur les figures 11 et 12 et ont été obtenus pour les tensions $T_0 = 36.6$ N et $T_0 = 47.6$ N (augmentation de 30 %).

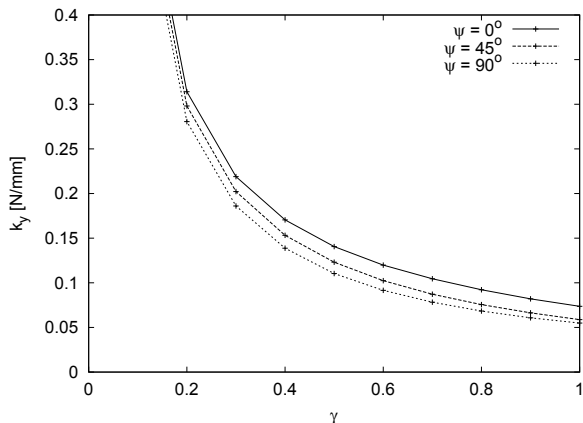


FIG. 11: Raideur le long de la baguette en fonction de l'inclinaison de l'archet ($T_0 = 36.6$ N).

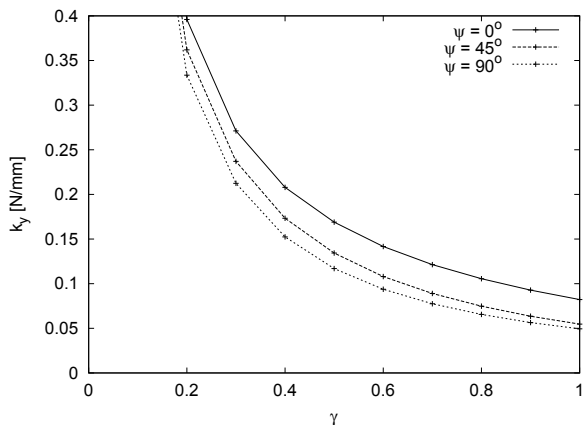


FIG. 12: Raideur le long de la baguette en fonction de l'inclinaison de l'archet ($T_0 = 47.6$ N).

On observe une diminution de la raideur lorsque l'archet est incliné. Ceci est une conséquence de la tension du crin sur la flexion latérale de la baguette, effet mis en évidence dans un travail précédent [5]. De plus, l'écart entre raideur verticale et latérale augmente sensiblement avec la tension du crin.

5 Conclusion

Un modèle d'archet incluant la baguette et le crin a été développé. Après recalage par rapport à un archet de référence, une bonne concordance entre les simulations et des résultats expérimentaux a été observée. Par ailleurs, la méthode mise en œuvre pour mesurer la tension du crin semble fournir une estimation satisfaisante. Sa validation sur un archet instrumenté est envisagée. Le lien entre les propriétés mécaniques en statique et les qualités de jeu de l'archet reste à établir.

Remerciements

Les travaux présentés dans cette communication ont été réalisés dans le cadre de PAFI, projet soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche.

Références

- [1] Gautier F., Doutaut V., Fouilleul J.M., "Lutherie Tools : projet collaboratif entre ateliers de lutherie et laboratoires", *Musique & technique* 4, 21-27 (2009).
- [2] Askenfelt A., "Observations on the violin bow and the interaction with the string", *Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics* (1995).
- [3] Demoucron M., Askenfelt A., Caussé R., "Measuring Bow Force in Bowed String Performance : Theory and Implementation of a Bow Force Sensor", *Acta Acustica united with Acustica* 95(4), 718-732 (2009).
- [4] Pitteroff R., *Contact mechanics of the bowed string*, Ph.D. diss., University of Cambridge (1995).
- [5] Ablitzer F., Dalmont J.P., Dauchez N., "Modélisation statique de l'archet de violon : influence de la tension du crin sur la raideur latérale", *Actes du Congrès Français de Mécanique* (2009).