

Résumé

Le pli vocal humain possède des propriétés vibratoires exceptionnelles. Il est capable de supporter de grandes déformations de manière répétée, réversible et à haute fréquence. Ces propriétés vibro-mécaniques particulières sont étroitement liées à sa microstructure: une structure multi-couches complexe fortement hétérogène, composée de réseaux de fibres protéiques. Cependant, il est encore aujourd'hui difficile de décrire précisément le rôle des spécificités microstructurales du pli dans son comportement biomécanique. Afin de préciser ce lien et d'aller vers une meilleure compréhension du comportement du tissu vocal, nous proposons trois approches complémentaires, mêlant caractérisation microstructurale, caractérisation mécanique et modélisation. Dans un premier temps, la microstructure 3D du pli est étudiée *ex vivo* par microtomographie synchrotron à rayons X par contraste de phase. Cette technique a permis de révéler la structure du tissu à différentes échelles. En particulier, des clichés 3D à haute résolution spatiale de la structure fibreuse des couches supérieures et musculaires du tissu ont pu être acquis. Ces clichés ont donné lieu à une analyse 3D quantitative de l'arrangement fibreux, permettant par exemple la détermination de l'orientation et de la géométrie 3D des fibres. Dans un second temps, le comportement mécanique des tissus fibreux du pli vocal sous différentes conditions de chargement a été étudié. Un protocole a été proposé, afin de caractériser un même échantillon en traction, en compression et en cisaillement simple. Ces essais ont permis de compléter les connaissances existantes sur la biomécanique du pli, et constitue des données de référence importantes pour la construction et la validation de modèles mécaniques. Enfin, à partir des données acquises expérimentalement, nous proposons un modèle micro mécanique pour les différentes couches fibreuses du pli vocal. Ce modèle, inspiré des approches moléculaires dans les élastomères, a la spécificité de prendre en compte l'arrangement 3D des fibres et leurs interactions stériques, à travers une représentation idéalisée mais pertinente de la microstructure fibreuse de chaque couche du pli. Les réponses macroscopiques prédites pour différents chargements ont pu être comparées avec succès aux réponses expérimentales. Ainsi, de possibles micromécanismes ayant lieu au cours de la déformation du réseau fibreux ont ainsi pu être proposés, ouvrant de nouvelles perspectives dans la compréhension des propriétés multi-échelles du pli vocal et la conception de futurs biomatériaux biomimétiques.

Mots-clés : Propriétés mécaniques du tissu vocal, microstructure du tissu vocal, modélisation micro-mécanique, matériaux composites, microtomographie RX, propriétés multi-échelles, conception biomimétique

Abstract

The human vocal fold owns exceptional vibratory properties. It undergoes large reversible and repeated deformations, for different types of loadings, at high frequency. These particular vibro-mechanical properties are closely linked to its microstructure: a multi-layer complex structure composed of highly heterogeneous protein fiber networks. However, it is still difficult today to describe precisely the implication of the microstructural specificities of the fold in its biomechanical behaviour. In order to clarify this link and to move towards a better understanding of the mechanics of the vocal tissue, we developed three complementary approaches, combining microstructural characterisation, mechanical characterisation and modelling. First, the microstructure of the fold was studied *ex vivo* using synchrotron X-ray tomography with phase retrieval imaging mode. This technique allowed the 3D structure of the tissue at different scales to be observed. In particular, high-resolution 3D images of the fibrous structure of the upper and muscular layers of the tissue were acquired. These images gave rise to a quantitative 3D analysis of the fibrous arrangement, e.g. with the determination of 3D fiber orientation and geometry. In a second step, the mechanical behaviour of the fibrous tissues of the vocal fold under different loading conditions was studied. A protocol has been proposed to characterise the same sample in tension, compression and shear. These tests have enhanced existing knowledge on fold biomechanics, and constitute an important reference database for the construction and validation of mechanical models. Finally, based on the data acquired experimentally, we proposed a micro-mechanical model for the fibrous layers of the vocal folds. This model, which is inspired from macromolecular models for rubbers, has the specificity to take into account the 3D arrangement of fibers as well as their steric hindrance, through an idealised but relevant representation of the fibrous microstructure of each layer. The macroscopic responses predicted for different loading conditions could be successfully compared to the experiments. Potential deformation micromechanisms of the fibrous networks could thus be proposed, opening new perspectives in the understanding of the multi-scale properties of the tissue, as well as in the design of new biomimetic biomaterials.

Mots-clés : Vocal tissue mechanical behavior, vocal tissue microstructure, micro-mechanical modelling, composite materials, RX microtomography, multi-scale properties, biomimetic design