

Résumé

Summary

Biominerals are minerals that are produced by some living beings, integrated externally (shell) or internally (bone, tooth) to their organism. They fulfill various purposes from protection (shell), tool (teeth) or ornament (deer antlers). This work is part of a research project aiming at a better understanding of the natural growth process of this material, called biomineralization, with the pearl oyster *Pinctada Margaritifera* as a study model. This oyster's shell is made of calcite prisms, a biomineral particularly difficult to study in optical microscopy due to its birefringence.

The purpose of this work is the development of a new computational microscopy method named vectorial ptychography. The intrinsic sensitivity of the latter to the phase and the vectorial nature of light gives access to both the isotropic properties (phase delay due to the optical index and the thickness, attenuation) and the anisotropic properties (birefringence, neutral axis orientations) of the studied sample.

Ptychography relies on a scan of the studied object by a coherent and finite size illumination. At each scan position the diffracted intensity pattern is measured. The object is afterward reconstructed numerically by the mean of an iterative algorithm. The experimental flexibility, robustness to noise and large field of view of ptychography make it a high-performance method. In its vectorial form, ptychography requires controlling the state of polarization of light and allows to reconstruct the Jones matrix at each point of the studied object. This is done by the use of three different polarization for the illumination and three polarization analysis of the diffracted field (nine measurements per scan position).

We have reported the first experimental demonstration of this method and have shown its imaging capability on a known birefringent object. Noticing that the partial knowledge of the illuminations could lead to reconstruction artefacts, we have developed an algorithm allowing their reconstruction jointly to the object, from the dataset. With this new algorithm we have observed a significant improvement on the reconstructed images. We have also suggested other approach allowing reduce the needed number of measurements per scan position, with a small reduction of the signal to noise ratio.

Noticing the limits of the method that allowed us to deduce the optical properties of a material from its experimental Jones matrix, we have developed a theoretical framework that generalizes it to all kind of materials and internal structures. We were therefore able to map the crystalline orientations inside several prisms of biomineral calcite and highlight some of their structural defects.

Résumé

Les biominéraux sont les minéraux produits par certains êtres vivants s'incorporant de façon externe (coquille) ou interne (os, dents) à leur organisme. Ils servent à remplir de multiples fonctions allant de la protection (coquille) à l'outil (dent), en passant par l'apparat (bois des cerfs). Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche visant à améliorer la compréhension de la synthèse naturelle de ces matériaux, appelée biominéralisation, avec comme objet d'étude l'huître perlière *Pinctada Margaritifera*. La coquille de cette huître est constituée de prismes de calcite, un biominéral particulièrement délicat à étudier en microscopie optique en raison de sa biréfringence.

Le but de ce travail de thèse est le développement d'une nouvelle méthode de microscopie computationnelle, appelée ptychographie vectorielle. La sensibilité intrinsèque de la ptychographie à la phase de la lumière et la prise en compte de la nature vectorielle de cette dernière donnent en principe accès à la fois aux propriétés isotropes (déphasage dû à l'épaisseur et à l'indice, atténuation) et anisotropes (biréfringence, orientation des axes neutres) des matériaux imagés.

La ptychographie repose sur le balayage de l'objet d'étude par une illumination cohérente de taille finie. À chaque position de balayage le cliché d'intensité diffracté est mesuré. L'objet est par la suite reconstruit numériquement par un algorithme itératif. Sa grande souplesse expérimentale, sa robustesse au bruit et son grand champ de vue en font une méthode d'imagerie très performante. Sous sa forme vectorielle, la ptychographie nécessite le contrôle des états de polarisation de la lumière, et permet de reconstruire la matrice de Jones en chaque point de l'objet étudié. Cela passe par l'utilisation de trois polarisations d'illuminations et de trois polarisations d'analyses du champ diffracté (neuf mesures par positions de balayage).

Nous avons fait la première démonstration expérimentale de cette méthode et en avons montré les capacités sur un objet biréfringent connu. La connaissance partielle de nos illuminations pouvant donner lieu à des artefacts de reconstruction, nous avons développé un algorithme permettant leur reconstruction directe, conjointement à l'objet, à partir des données mesurées. Nous avons pu constater les améliorations produites sur les images reconstruites. Nous avons également proposé plusieurs approches permettant de réduire significativement le nombre de mesures nécessaires, au prix d'une légère diminution du ratio signal sur bruit.

Constatant les limites des méthodes permettant de déduire les propriétés optiques d'un matériau à partir de sa matrice de Jones expérimentale, nous avons développé le cadre théorique de ce formalisme, afin d'en généraliser l'usage à tous types de matériaux et d'assemblages. Nous avons ainsi pu cartographier les orientations cristallines à l'intérieur de plusieurs prismes de calcite biominérale et mettre en évidence des défauts d'empilement.