De la mesure archéométrique au rendu physique : caractérisation des propriétés optiques d'alliages en bronze

Localisation
Inria - Univ. Bordeaux, MANAO research team : http://manao.inria.fr
Encadrement
Inès Bréchignac : ines.brechignac@inria.fr
Pierre Mézières : pierre.mezieres@inria.fr
Romain Pacanowski : romain.pacanowski@inria.fr
Xavier Granier : xavier.granier@institutoptique.fr

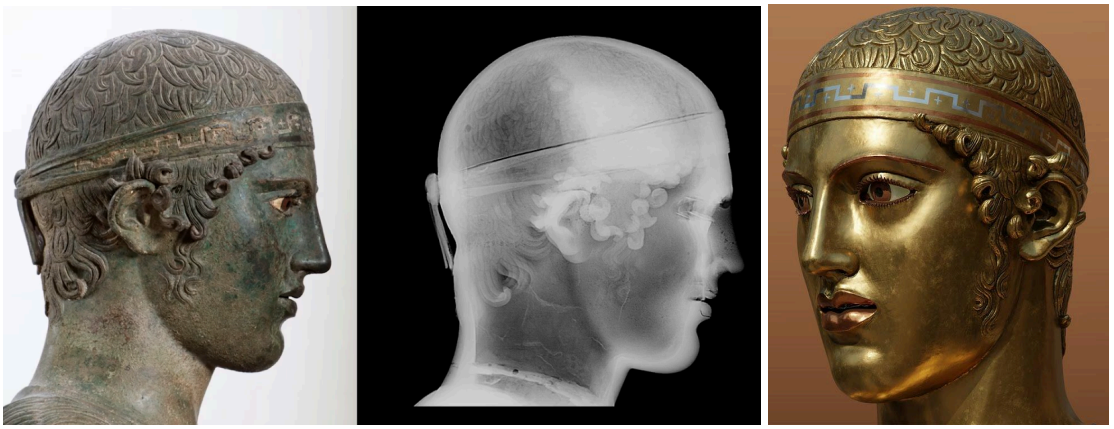


Figure 1 : *Campagne d'analyses de l'Aurige de Delphes (C2RMF) - Restitution 3D "subjective" (Archéovision).*

Contexte

Aujourd'hui, même si les jumeaux numériques peuvent être visuellement très convaincants, les modèles d'apparence utilisés dans le domaine du patrimoine restent souvent limités à la simple couleur ou à de faux matériaux définis au jugé de l'artiste. Ils ne rendent compte ni des propriétés physiques de l'objet (état de surface, propriétés optiques) ni de la richesse des données archéométriques disponibles (composition physico-chimique, méthodes d'artisanat...).

Ce stage de 6 mois au sein de l'équipe Manao s'inscrit dans un projet en collaboration avec le C2RMF, le Musée du Louvre et Archéovision sur la restitution de l'apparence d'un grand bronze antique du Ve siècle av. JC : l'Aurige de Delphes [0]. L'objectif de ce projet est de proposer une nouvelle méthodologie permettant d'ancrer la simulation dans la réalité physique et archéologique de l'objet.

Si la restitution de l'apparence d'un alliage en bronze à partir de mesures archéométriques a déjà été explorée dans la littérature [1], ce stage s'intéresse au problème inverse : comment, à partir de mesures d'apparence, de rugosité et de composition du matériau, peut-on remonter à ses propriétés optiques complexes ?

Sujet

La BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) est une fonction radiométrique décrivant l'apparence d'un objet suivant un point de vue et un éclairage donnés [2]. Cette fonction est souvent décrite en informatique graphique par la théorie des micro-facettes [3]. Description statistique de la surface sous la forme de micro-miroirs, cette fonction dépend de la géométrie de la surface (rugosité) et de ses propriétés optiques (terme de Fresnel).

Si la caractérisation géométrique de la surface peut se faire relativement facilement lors de campagnes de mesures (microscope confocale, photogrammétrie), la mesure de l'indice optique effectif d'un alliage métallique peut s'avérer plus complexe.
La précision des mesures ellipsométriques est soumise à de lourdes contraintes expérimentales qui ne sont pas adaptées aux usages de l'archéomètre. Celui-ci privilégiera plutôt des mesures de composition de l'objet (XRF, PIXE [4]) à partir desquelles il est possible de calculer l'indice optique effectif de la surface par des lois d'homogénéisation [5] mais dont les hypothèses sur la structure interne de l'alliage restent limitantes.
Par ailleurs, d'un point de vue rendu, des approximations pour représenter le Fresnel d'objets métalliques ont été développées, mais celles-ci ne rendent pas compte de la réalité physique du métal [6].
En partant du travail de Tetzlaff [7] qui estime à partir des mesures multies-vues prises en rétro-réflexion la SVBRDF (rugosité et terme de Fresnel) d'un objet 3D, l'objectif de ce stage est d'étudier l'adaptation de cette méthode à des mesures spectrales.
Dans le cadre de ce stage, nous travaillerons avec des échantillons de bronze fournis par le C2RMF : 11 échantillons polis aux compositions variables sur lesquels ont été effectués un ensemble de mesures. L'objectif ici est d'exploiter conjointement les mesures en rétro-réflexion, de composition et d'état de surface afin d'estimer l'indice optique effectif de l'alliage et de le comparer aux mesures ellipsométriques réalisées sur l'échantillon.
Le travail se répartira en plusieurs étapes :

- Prise en main et implémentation de la méthode de Tetzlaff dans une scène synthétique afin d'en comprendre le fonctionnement et d'en évaluer les limites.
- Adaptation de la méthode d'inversion aux mesures spectrales en rétro-réflexion, en intégrant les contraintes issues des mesures de rugosité et de composition.
- Évaluation de la méthode sur les échantillons de bronze et comparaison des propriétés optiques estimées avec les mesures ellipsométriques de référence.
- En fonction du profil du candidat ou de la candidate, possible étude exploratoire d'un nouveau montage optique permettant d'enrichir les mesures en rétro-réflexion.

Profil recherché
Étudiant ou étudiante de M2 en informatique graphique ou en optique numérique avec une curiosité pour les sujets transverses (optiques, matériaux, patrimoine) et une appétence pour la recherche.

Mots clés
BRDF
Modèles micro-facettes
Méthodes numériques
Optique géométrique
Rendu inverse
Archéométrie
Langage de Programmation Python

Références
[0] Descamps-Lequime S. & Mille B. (2023). Les secrets de l'Aurige de Delphes. *Les Midis de l'Archéologie - C2RMF* https://www.youtube.com/watch?v=ru8wdfpwKII
[1] Callet, P. (2005). Virtual restoration of bronze-3d capture and optical simulation in parallel spectral ray-tracing. In *International Cultural Heritage Informatics Meeting ICHIM*.

[2]Nicodemus, F. E., Richmond, J. C., Hsia, J. J., Ginsberg, I. W., & Limperis, T. (1977). *Geometrical considerations and nomenclature for reflectance* (Vol. 160, pp. 1-52). Washington, DC, USA: US Department of Commerce, National Bureau of Standards.
[3] Torrance, K. E., & Sparrow, E. M. (1967). Theory for off-specular reflection from roughened surfaces. *Journal of the Optical society of America*, *57*(9), 1105-1114.
[4] Aglae (2025) - C2RMF. https://c2rmf.fr/actualite/aglae
[5] Markel, V. A. (2016). Introduction to the Maxwell Garnett approximation: tutorial. *Journal of the Optical Society of America A*, *33*(7), 1244-1256.
[6] Gulbrandsen, O. (2014). Artist friendly metallic fresnel. *Journal of Computer Graphics Techniques*, *3*(4).
[7] Tetzlaff, M. (2023). High-fidelity specular svbrdf acquisition from flash photographs. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *30*(4), 1885-1896.