

Nouvelle approche d'archéologie expérimentale numérique pour la simulation de l'impact des fumées sur les ambiances lumineuses : le cas du foyer perpétuel du temple d'Apollon à Delphes.

Thèse financée à pourvoir avant le 30 juin 2025 !

Contacts :

Delphine Lacanette : delphine.lacanette@u-bordeaux.fr

Xavier Granier : xavier.granier@u-bordeaux.fr

Vincent Baillet : vincent.baillet@u-bordeaux-montaigne.fr

Contexte

Le site de Delphes comprend le temple d'Apollon, dans lequel la gestion de l'éclairage au sein de l'adyton, considéré par les Grecs comme le « Saint des Saints » constitue le point focal du présent projet doctoral interdisciplinaire. En effet, l'étude de l'éclairage au sein de cet espace dédié à la consultation oraculaire constitue un pan entier que l'archéologie classique n'a pu investir en profondeur, faute d'éléments matériels ou de données factuelles exploitables.

De cet espace oraculaire, on connaît la présence d'un autel dédié à la déesse Hestia qui prend la forme d'un véritable foyer, frotté d'huile parfumée, nourri perpétuellement de bois de sapin. Selon Plutarque, sa surveillance était confiée à des femmes tenues d'observer une chasteté absolue, au nombre desquelles figurait probablement la pythie, l'oracle de Delphes. Lors des Pythaïdes, processions solennelles organisées par Athènes au sein du sanctuaire d'Apollon à Delphes, une femme dite porteuse de feu venait chercher dans le temple d'Apollon, une « parcelle » de ce feu perpétuel pour raviver le foyer du Pythion athénien.

Ce foyer dédié à Hestia a ainsi joué un rôle essentiel dans la mise en scène des cérémonies religieuses, mais aussi dans la mise en œuvre des pratiques sacrées. D'emblée, il convient d'indiquer que ces recherches n'entendent pas comprendre ce que pouvaient ressentir les Grecs dans cet environnement culturel. Cet objectif est illusoire puisque la perception est avant tout une définition subjective.

Au contraire, il s'agit d'analyser la scénographie lumineuse, en partant de la restitution du temple d'Apollon qui sera pourvue par le projet interdisciplinaire ORACLE, pour déduire où passent les rayons lumineux et pour quels effets scéniques. **Autrement dit, quelle partition joue la lumière dans la mise en œuvre des pratiques religieuses à Delphes ?**

Interroger l'usage de cette lumière sacrée est essentiel pour comprendre comment la cérémonie religieuse a pu être mise en œuvre de manière pratique dans une cella confinée, sans ouverture sur l'extérieur. Par ailleurs, la vue de ce qui se trouvait dans le temple d'Apollon était réservé à ceux qui étaient introduits. Il convient de s'interroger sur le mode de fonctionnement, ainsi que de l'efficacité de ce foyer divin dans le naos. Sans vouloir dresser une liste exhaustive de tous les enjeux, en corrélant caractéristiques fonctionnelles des rites delphiques aux aspects pratiques, on remarque que plusieurs points d'achoppements persistent. Comment un tel foyer pouvait-il être perpétuellement alimenté convenablement dans un environnement clos sans ouverture sur l'extérieur ? Dans quelle mesure le dégagement des fumées pouvait-il être problématique pour la gestion des consultations oraculaires et des membres du clergé delphique ? Par ailleurs, on peut légitimement au regard de ces questionnements purement pratiques, s'interroger sur le besoin d'éclairage, était-il vraiment attendu à l'intérieur du naos ? Est-ce qu'il était sujet à éclairer la statue de la divinité ? La pythie ou encore le manteion ? Toutes ces perspectives méritent d'être explorées pour affiner notre connaissance de la gestion et de l'ambiance lumineuse qui en découle au sein du naos.

Pour aborder ces enjeux, une approche conventionnelle propre à l'archéologie classique ne permet pas de saisir pleinement toutes les dimensions fonctionnelles ou symboliques propres à cet instrument éminemment culturel. La plupart des recherches académiques sur les temples grecs se sont concentrées sur les plans au sol et les élévations, plutôt que sur les parties intérieures et ce qu'ils contenaient, notamment sur les instruments liés au culte dont fait partie le feu perpétuel d'Hestia à Delphes. Cela est en partie dû au manque de sources anciennes qui restent peu loquaces sur le contenu et les fonctions des parties intérieures, contrairement aux témoignages laissés par certains traités d'architecture comme ceux de Vitruve, préoccupé par la perfection des ordres architecturaux ou encore l'étude des blocs architecturaux mis au jour par l'archéologie. Cette situation montre que l'étude de la lumière sacrée, témoignage immatériel des pratiques sacrées antiques a été négligée ou ignorée par un manque criant de données exploitables permettant d'opérer une analyse rigoureuse du rôle de la lumière dans les rituels sacrés.

Objectifs

De nombreux outils existent pour mener à bien la simulation de la diffusion des fumées et la propagation de la lumière pour reproduire l'ambiance à l'intérieur du temple d'Apollon.

D'un côté, il y a la simulation numérique en mécanique des fluides, qui permettra de simuler à la fois la combustion du foyer et la propagation des fumées dans le naos. Nous nous basons sur les travaux effectués au laboratoire I2M [1] et dans le cadre de la thèse de Fabien Salmon [2] qui portent sur la simulation des feux archéologiques dans la grotte Chauvet-Pont d'Arc au Paléolithique (Programme CarMoThaP, dir. C. Ferrier) et dont nous avons pu retracer le positionnement et l'intensité, ainsi que la quantité de combustible et l'essence du bois, à partir des marques sur les parois [3]. C'est le code open source Open FOAM et son module feu appelé Fire FOAM qui ont été utilisés.

La trajectoire des fumées issues de la combustion sera simulée en fonction du degré de confinement du milieu ambiant (présence ou non d'un plafond dans le temple, porte ouverte ou fermée). La force de la simulation réside dans la possibilité de multiplier les simulations pour chaque hypothèse de morphologie 3D issue des travaux réalisés par les archéologues (V. Baillet, Archéosciences).

La problématique reste l'opacité de ces fumées, souvent mal retranscrite par les codes précités. C'est ce couplage avec les outils de rendu visuel qui fera la richesse de la thèse.

D'un autre côté, il y a les outils issus des travaux en informatique graphique. Ces outils-là favorisent souvent la vitesse, l'efficacité. Il en résulte des méthodes de calcul rapide que l'on pourrait envisager pour la simulation à condition de valider leur précision dans le contexte de l'objet d'étude. Les techniques récentes [4,5] illustrent parfaitement ce que l'on peut visuellement obtenir.

Mais au-delà de la simulation des trajectoires des fumées, le rendu visuel d'une telle simulation est plus qu'important pour rendre compte de l'ambiance et l'étudier de manière archéologique. Pour cela, il est important de pouvoir retrouver les paramètres de simulations. C'est une des approches que l'on retrouve actuellement sous le terme « différentiable rendering » et qui a été appliquée aux milieux participatifs [6]. D'une manière générale, les méthodes d'apprentissages ouvrent de très belles perspectives [7].

Nous proposons dans cette thèse une nouvelle approche, étendant la notion « d'archéologie expérimentale » au prisme d'une démarche entièrement numérique. D'emblée, il convient d'indiquer qu'il ne s'agit pas de mettre en place une démarche d'archéologie expérimentale qui nécessiterait l'expertise entre autres d'archéomètres, afin de déterminer des aspects physiques (température extérieure, temps de séchage de l'essence, impact sur l'éclairage...etc.) propres à la combustion d'un foyer mais qui restent des facteurs périphériques ayant un impact relatif sur les questionnements envisagés dans le projet doctoral. C'est pourquoi, nous considérons qu'une

expérimentation numérique qui vise à simuler l'éclairage sur la base de données physique (température, spectre et intensité lumineuse émise, absorption/diffusion spectrale, ...) et de faits archéologiques (essence connue : sapin) déjà à notre disposition est pleinement satisfaisante. Ces données tout comme les paramètres servant à la simulation de la propagation de la lumière et des fluides en seront déduits par des méthodes d'apprentissage. Enfin, nous n'écartons pas la possibilité de recourir à l'archéologie expérimentale comme perspectives utiles au futur doctorant. Pour autant, cela nécessitera à moyen terme la construction d'un projet spécifique (réponse à un appel à projets...) et des collaborations complémentaires qui sont par ailleurs déjà identifiées auprès de partenaires locaux et à l'échelle nationale (Archéosciences Bordeaux UMR 6034, PACEA UMR 5199, TRACES UMR 5608).

Enfin, une telle approche laisse envisager la possibilité dans un second temps d'ajuster tous ces paramètres pour aller vers une exploration interactive [8] de leur impact sur l'ambiance reconstruite.

- [1] Lacanette D., Mindeguia J. C., Brodard A., Ferrier C., Guibert P., Leblanc J. C., Malaurent P., Sirieix C. (2017). Simulation of an experimental fire in an underground limestone quarry for the study of Paleolithic fires. *International Journal of Thermal Sciences*, 120, 1-18. doi : 10.1016/j.ijthermalsci.2017.05.021
- [2] Salmon, F., Simulation aéro-thermo-mécanique des effets du feu sur les parois d'un milieu confiné. Application à l'étude des thermo-altérations dans la grotte Chauvet-Pont d'Arc. Thèse en mécanique de l'Université de Bordeaux, 28 mars 2019.
- [3] Salmon, F., Ferrier, C., Lacanette, D., Mindeguia, J. C., Leblanc, J. C., Fritz, C., Sirieix, C. (2020). Numerical reconstruction of paleolithic fires in the Chauvet-Pont d'Arc Cave (Ardèche, France). *Journal of Archaeological Method and Theory*, 1-13. doi : 10.1007/s10816-020-09484-5
- [4] Yiming Wang, Siyu Tang, and Mengyu Chu. 2024. Physics-Informed Learning of Characteristic Trajectories for Smoke Reconstruction. In *ACM SIGGRAPH 2024 Conference Papers (SIGGRAPH '24)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 53, 1–11. <https://doi.org/10.1145/3641519.3657483>
- [5] Mohammad Sina Nabizadeh, Ritoban Roy-Chowdhury, Hang Yin, Ravi Ramamoorthi, and Albert Chern. 2024. Fluid Implicit Particles on Coadjoint Orbits. *ACM Trans. Graph.* 43, 6, Article 270 (December 2024), 38 pages. <https://doi.org/10.1145/3687970>
- [6] Cen, Yunchi, Qifan Zhang, and Xiaohui Liang. 2023. "Physics-Based Differentiable Rendering for Efficient and Plausible Fluid Modeling from Monocular Video" *Entropy* 25, no. 9: 1348. <https://doi.org/10.3390/e2509134>
- [7] Cen, Y., Li, C., Li, F.W.B., Yang, B. and Liang, X. (2023), A Differential Diffusion Theory for Participating Media. *Computer Graphics Forum*, 42: e14956. <https://doi.org/10.1111/cgf.14956>
- [8] Jiaxiong Qiu, Ruihong Cen, Zhong Li, Han Yan, Ming-Ming Cheng, and Bo Ren. 2024. NeuSmoke: Efficient Smoke Reconstruction and View Synthesis with Neural Transportation Fields. In *SIGGRAPH Asia 2024 Conference Papers (SA '24)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 22, 1–12. <https://doi.org/10.1145/3680528.3687667>

Si les sources historiques nous renseignent sur les combustibles principaux propres à ce foyer, il reste à définir des données physiques essentielles pour aboutir à des modèles numériques de simulation extrêmement rigoureux dont : l'intensité lumineuse, l'éclairage, la luminance, l'opacité des fumées ou encore la température de la couleur. À cet effet, ce projet doctoral favorisera l'émergence de données inédites utiles qui permettraient d'appréhender le fonctionnement et les impacts scéniques propres à ce foyer perpétuel dédié à Hestia.

Par ailleurs, cette recherche doctorale exploratoire entend produire des résultats scientifiques significatifs sur la simulation et le transport des fumées autour de la fonction de phase et la notion de « differential rendering smoke ». Les implications méthodologiques sont multiples et un des points forts du présent projet doctoral est la démarche d'expérimentations numériques archéologiques qui permettra de définir l'opacité des fumées en fonction des propositions de morphologie du site, particulièrement utiles pour nourrir les hypothèses de restitution de l'espace oraculaire.

Méthodologie

Le doctorant sera principalement présent à l'I2M, laboratoire dans lequel il disposera des outils de simulation et des moyens de calcul (supercalculateur de l'Université de Bordeaux et supercalculateurs nationaux). A l'I2M il pourra simuler la combustion du foyer perpétuel dans la morphologie 3D du temple d'Apollon, restituée par Archéosciences, avec un code de combustion tel que FDS ou FireFOAM (code feu d'OpenFOAM). La trajectoire des fumées en fonction des hypothèses de restitution de la morphologie du temple retenue sera également simulée.

De par son co-encadrement par X. Granier, membre du LP2N, il sera intégré à l'équipe CGO (Computer Graphics & Optics) spécialiste de la recherche à la frontière entre l'informatique graphique et l'optique, avec un contexte d'application privilégié que sont les sciences du patrimoine. Cette intégration sera un accès direct à l'état de l'art de la simulation de la propagation de la lumière et de l'acquisition des données pour cette simulation. Il aura accès à des codes internes comme des codes issus de la recherche (e.g., Mitsuba <https://www.mitsuba-renderer.org/>). Il aura accès à du matériel financé par le projet tremplin CNRS pour permettre la capture contrôlée d'images qui serviront de base à l'apprentissage des paramètres de simulation. Parallèlement à l'encadrement principal entre l'I2M et le LP2N, le doctorant bénéficiera d'un accueil sans réserve tout au long de son projet doctoral au sein de l'UMR 6034 à Archéosciences Bordeaux.

Le doctorant bénéficiera ainsi de l'expertise et du soutien des ingénieurs 3D de la plateforme technologique de l'université de Bordeaux Archeovision qui est rattachée à l'UMR 6034 Archéosciences Bordeaux. Cette plateforme en lien avec des chercheurs en Archéologie (V. Baillet) et en archéométrie (R. Chapoulie, A. Mounier) d'Archéosciences Bordeaux œuvrent sur l'étude morphologique et architecturale du temple et du sanctuaire d'Apollon en 3D. Le doctorant aura ainsi accès aux méthodologies mais aussi aux derniers résultats (hypothèses relatives de la restitution en 3D de l'espace intérieur du temple d'Apollon au I^{ve} siècle a. C.) relatifs au projet RIE ORACLE. Par ailleurs, le doctorant aura accès à l'ensemble des données 3D utiles, afin qu'il puisse conduire les simulations relatives à ces travaux de recherche. Enfin, ce projet doctoral centré sur le développement de nouvelles hypothèses fondées sur la propagation des fumées et de leur opacité permettra de nourrir les discussions sur l'intervisibilité de l'espace oraculaire ou encore sur le rôle sensible de la lumière dans la mise en œuvre de la consultation oraculaire auprès de la Pythie.

Enfin, des réunions régulières seront engagées entre les 3 unités de recherche pour assurer le dialogue interdisciplinaire nécessaire aux recherches du doctorant. De même, le doctorant sera intégré au consortium formé dans le cadre du projet RIE ORACLE.

Profil recherché

Le doctorant devra avoir un profil démontrant sa capacité à aborder des problèmes de simulation.

Pour cela, il devra avoir de bonnes bases en :

1. Méthodes numériques
2. Physique (mécanique - optique)
3. Programmation

Le doctorant devra posséder une appétence pour le patrimoine historique et la 3D.

Date de démarrage : septembre/octobre 2025

Encadrement : Delphine Lacanette (PR I2M UMR 5295, Bordeaux INP), Xavier Granier (PR LP2N UMR 5298, Institut d'Optique), Vincent Baillet (chercheur Archéosciences Bordeaux UMR 6034)

université
de BORDEAUX



Lieu : Principalement I2M (Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux), avec des périodes au LP2N (Laboratoire Photonique Numérique et Nanosciences) et au laboratoire Archeosciences Bordeaux (Université Bordeaux Montaigne)

Des missions sur place, sur le site de Delphes, seront réalisées annuellement.

Financement du salaire, des équipements et des missions : projet RIE (Université de Bordeaux) acquis