

Détection de sites archéologiques en Mongolie par apprentissage profond appliqué à l'imagerie aérienne dans une perspective de science ouverte

Contexte et enjeux patrimoniaux

Dès les commencements de la photographie aérienne au début du XXe siècle, les archéologues se saisissent de son potentiel afin de révéler des structures invisibles au sol et d'appréhender l'organisation spatiale de vastes complexes monumentaux. La documentation aérienne est aujourd'hui devenue un standard de l'archéologie de terrain et génère ainsi une quantité massive d'informations. La localisation et la délimitation des structures archéologiques à partir de ces acquisitions deviennent alors très chronophages, constituant un nouvel enjeu majeur pour la recherche archéologique.



Fig. 1 : Khirgisuur, Mongolie centrale.

Les versants des monts Khangai en Mongolie centrale illustrent parfaitement cette situation. Ils abritent des milliers de monuments funéraires en pierre sèche datant de l'âge du Bronze et du début de l'âge du Fer : les **khirgisuur** (Fig. 1). Ces vastes tertres funéraires sont souvent associés aux pierres à cerf, des stèles mégalithiques ornées de cervidés stylisés, et à d'autres structures satellites comme des autels sacrificiels. Ces ensembles sont les plus importants subsistant de la culture des peuples nomades eurasiens ayant évolué entre les IIe et Ier millénaires avant J.-C. et sont des témoignages exceptionnels du cérémonial mégalithique. S'ils sont cependant difficiles à repérer depuis le sol, les paysages ouverts des steppes facilitent la détection par orthophotographie, dont des campagnes de prises de vues par drones ont été produites récemment ^[1].

Inscrits depuis peu au **patrimoine mondial de l'UNESCO**, ces monuments demeurent méconnus, même localement, alors que les premières études révèlent leur très forte densité. Dans un contexte de changement climatique, d'intensification des usages des sols et de risques de pillage, l'identification rapide et systématique de ces structures constitue un enjeu prioritaire de protection.

Projet de thèse

À la suite de méthodes plus traditionnelles d'apprentissage automatique prenant pour base la précédente campagne de prises de vues par drone ^[1], cette thèse vise à développer des méthodes de **détection et de segmentation automatiques** des monuments khirgisuur en mobilisant les avancées récentes de l'**apprentissage statistique profond** en vision par ordinateur, jamais exploitées dans ce cadre jusqu'alors.

La première phase consistera à entraîner et optimiser des modèles de segmentation capables d'**identifier les monuments et leurs composantes** comme les tertres centraux, les cercles périphériques et les alignements. Les modèles habituellement utilisés pour ce genre de tâches (U-Net, Mask R-CNN) nécessiteront des adaptations pour pallier les difficultés à la détection de structures en creux, peu visibles, et à l'utilisation d'images haute résolution. Cette segmentation fine produira des données morphométriques exploitables pour des analyses statistiques, comme les relations entre la taille du tertre, l'organisation périphérique et les typologies funéraires. Ces spécificités morphologiques pourront être intégrées aux modèles grâce à des contraintes spatiales ou hiérarchiques afin d'améliorer leurs résultats. Cette thèse ouvrira donc la voie à une **approche quantitative renouvelée des pratiques funéraires** de l'âge du Bronze. Initialement circonscrit à la vallée du Khoid Tamir qui a déjà été survolée et annotée, le projet bénéficiera également des prochaines campagnes de détection en obtenant de nouvelles images adaptées aux besoins qui surviendront.

Dans un second temps, la méthode sera étendue à des images satellitaires afin d'identifier les grands tertres centraux à l'échelle régionale, étape préalable à des campagnes ciblées de survol par drone. Cette stratégie réduira drastiquement les moyens nécessaires à l'inventaire de ces sites dans le contexte de la **numérisation du patrimoine**. Ces images, disponibles à différentes dates sur de très longues périodes, présentent des variations importantes de visibilité pour un même site. L'adaptation d'approches capables d'exploiter simultanément la diversité des échelles et des temporalités permettra ainsi d'**améliorer la performance des modèles**.

Le projet contribuera donc à l'enrichissement des connaissances sur ces sites exceptionnels classés aux patrimoines mondiaux de l'UNESCO, aux réflexions portées sur les apports de **l'intelligence artificielle en humanités numériques** et au développement de nouvelles solutions pour des problématiques actuelles en télédétection automatique.

Science ouverte, accessibilité et enjeux éthiques

En parallèle, un **portail d'annotation collaborative** pour les images satellitaires sera mis en place en **science ouverte et participative**. À la fois support de médiation et de numérisation du patrimoine, il permettra à tout acteur, citoyen ou association, de s'impliquer activement dans la recherche sur le patrimoine culturel en découvrant de nouveaux sites et structures archéologiques. La localisation de ces sites, particulièrement chronophage en raison de l'étendue de la zone, permettra d'enrichir l'entraînement de modèles de vision basés sur l'imagerie satellitaire. Ces annotations constitueront également un point de départ essentiel pour planifier de futures missions de prospection et des chantiers archéologiques. Cette plateforme stimulera l'engagement des participants grâce à **la ludification et l'appropriation des patrimoines réels et numériques**. Elle facilitera l'annotation grâce à des outils d'**apprentissage semi-supervisé** ainsi que la supervision par les archéologues. La diffusion des données et des résultats comporte cependant des enjeux éthiques : la protection des sites sensibles, le respect des législations nationales et des droits des communautés locales ainsi que la maîtrise des mésusages (pillages, exploitation commerciale). Ces risques nécessiteront la mise en place de cadres méthodologiques robustes et transparents, garantissant une **numérisation responsable du patrimoine archéologique**, de la collecte au partage des données. Cette démarche sera élaborée en étroite collaboration avec les institutions locales, notamment l'Université Nationale de Mongolie (Oulan-Bator), ainsi qu'avec plusieurs institutions internationales déjà impliquées dans l'étude de la zone (p.ex., Musée d'Anthropologie préhistorique de Monaco, Leibniz-Zentrum für Archäologie, Horsepower project, L'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales). Le projet pourra également bénéficier de la convention de coopération entre Sorbonne Université et Université Nationale de Mongolie (2025-2030).

Encadrement scientifique, multidisciplinarité et collaborations

Cette thèse sera intégrée au sein du laboratoire LIP6 (EDITE de Paris, Sorbonne Université), sous la direction de **Dominique Béréziat** (HDR), spécialiste en apprentissage profond et vision par ordinateur ^[2,3], garant de la solidité méthodologique et informatique du projet.

Elle sera co-dirigée par **Josef Wilczek** (MCF, Centre André Chastel, Sorbonne Université), spécialiste en archéologie numérique ^[4], directeur des missions archéologiques de la Sorbonne Université dans la zone d'étude, et co-auteur des articles explorant la détection automatique des tombes et de l'art rupestre en Mongolie par apprentissage automatique ^[1].

Elle bénéficiera également de l'expertise de **Jérôme Magail**, co-auteur de ces articles ^[1], directeur de la mission archéologique en Mongolie du Musée d'Anthropologie préhistorique de Monaco, qui détient l'autorisation de survol par drone pour les zones concernées par la thèse.

Profil recherché

La candidate ou le candidat devra posséder une formation solide en sciences des données et une expérience en archéologie numérique, avec un intérêt marqué pour les sciences du patrimoine, l'interdisciplinarité et les enjeux éthiques liés aux données culturelles.

[1] F. Monna, J. Magail, T. Rolland, N. Navarro, J. Wilczek, J.-O. Gantulga, Y. Esin, L. Granjon, A.-C. Allard, et C. Chateau-Smith. Machine learning for rapid mapping of archaeological structures made of dry stones – Example of burial monuments from the Khirgisuur culture, Mongolia. *Journal of Cultural Heritage*, 43, 2020.

[2] M. Bosc, A. Chan Hon Tong, A. Bouchard, et D. Béréziat. Predicting thunderstorm risk probability at very short time range using deep learning. *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS)*, 2026. Accepted for publication.

[3] P. Garcia, I. Larroche, A. Pesnec, H. Bull, T. Archambault, E. Moschos, A. Stegner, A. Charantonis, et D. Béréziat. Orcast: Operational high-resolution current forecasts. *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, 4, 2025.

[4] J. Wilczek, R. Thér, F. Monna, C. Gentil, C. Roudet, et C. Chateau-Smith. Discrimination of wheel-thrown pottery surface treatment by deep learning. *Archaeological and Anthropological Science*, 14:85, 2022.