Applications de la photogrammétrie à la documentation de l'art rupestre, des chantiers de fouilles et du bâti

Jérôme Magail, Fabrice Monna, Yury Esin, Josef Wilczek, Chimiddorj Yeruul-Erdene, Jamyan-Ombo Gantulga

▶ **To cite this version:**

Jérôme Magail, Fabrice Monna, Yury Esin, Josef Wilczek, Chimiddorj Yeruul-Erdene, et al.. Applications de la photogrammétrie à la documentation de l'art rupestre, des chantiers de fouilles et du bâti. Bulletin du Musée d'Anthropologie préhistorique de Monaco, 2016. halshs-03823267

HAL Id: halshs-03823267
https://shs.hal.science/halshs-03823267

Submitted on 13 Jan 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

APPLICATIONS DE LA PHOTOGRAMMÉTRIE À LA DOCUMENTATION DE L'ART RUPESTRE, DES CHANTIERS DE FOUILLES ET DU BÂTI

Missions du Musée d'Anthropologie préhistorique de Monaco

par

Jérôme MAGAIL*, Fabrice MONNA**, Yury ESIN***, Josef WILCZEK****,
Chimiddorj YERUUL-ERDENE***** et Jamyan-Ombo GANTULGA*****

Mots-clés.– Archéologie, photogrammétrie, art rupestre, stèles, Pierres à cerfs, âge du Fer, âge du Bronze, Mongolie, Sibérie, Mont Bego.

Résumé.– Au cours de ses missions archéologiques, le Musée d'Anthropologie préhistorique de Monaco a testé la modélisation 3D de plusieurs types d'objets. Son équipe a choisi la méthode 'Structure-from-Motion' (SfM) qui fonctionne selon le principe de base de la photogrammétrie stéréoscopique, à savoir que la structure 3D peut être résolue à partir de deux images superposées et décalées. La plupart des autres méthodes capables d'acquérir, à haute résolution, des objets et des paysages souvent complexes, sont très coûteuses et d'une portabilité difficile. En utilisant uniquement un appareil photo numérique de qualité grand public et une échelle sur le sol, l'utilisateur se déplace dans l'environnement, en prenant des photographies de la zone d'intérêt depuis le plus possible d'endroits et de points de vue. Un logiciel est ensuite utilisé pour reconstituer la géométrie des scènes. Les résultats des exemples d'applications de la technique à l'art rupestre, aux chantiers archéologiques et à l'architecture sont présentés. De telles données sont précieuses pour l'inventaire du patrimoine archéologique sur des terrains difficiles et éloignés. Pour conclure, la production de SfM est directement comparée à celle obtenue à partir de la documentation archéologique classique.

Document engraving art, archaeological zone and architecture with photogrammetry

Keywords.– Archaeology, photogrammetry, engraving art, steles, deer stone, Iron age, Bronze age, Mongolia, Siberia, Mont Bego.

Abstract.– During his archaeological missions the Museum of Prehistoric Anthropology tested the 3D modelling of several types of objects. His team chose the 'Structure-from-Motion' (SfM) method which works according the basic principle of stereoscopic photogrammetry, namely that 3D structure can be resolved from two or more overlapping, offset images. Most of other methods capable of surveying, at high resolution, often complex objects and landforms are very expensive and have a difficult portability. Using only a consumer-grade digital camera and a scale on the ground, the user moves through the environment, acquiring photographs of the area of interest from as many locations and perspectives as possible. Software is then used to reconstruct scene geometry. Results from example applications of the technique to engraving art, archaeological zone and architecture are presented. Such data are invaluable for the archaeological heritage inventory on difficult and remote field. To conclude, SfM output is directly compared with that obtained from a classic archaeological documentation.

* Musée d'Anthropologie Préhistorique de Monaco, 56 bis, boulevard du Jardin Exotique MC 98000, Monaco. [jmagail@gouv.mc]
** ARTEHIS, UMR 6298 CNRS-Université de Bourgogne, Bat. Gabriel, F-21000 Dijon, France. [Fabrice.Monna@u-bourgogne.fr]
*** Institut de Recherche de Khakassie sur les Langues, la Littérature et l'Histoire, 23 Shchetinkin Str. Abakan, 655017 République de Khakassie, Russie. [esin2006@yandex.ru]
**** Ústav archeologie a muzeologie, Masarykova univerzita, Arna Nováka 1, 602 00 Brno, Česká republika. [josef.wilczek@hotmail.com]
***** Institut d'Histoire et d'Archéologie de l'Académie des Sciences de Mongolie, Jucov Street 77, Ulaanbaatar 51, Mongolie. [yeruul@gmail.com][ganuudg@gmail.com]

Fig. 1

Stèle n° 6 du site de Tsatsyn Ereg enveloppée d'une feuille transparente afin de procéder à son relevé. Ce type de techniques nécessite de bonnes conditions météorologiques, notamment sans vent. Ph. J. Magail.

Fig. 2

Pratique de l'estampage par application d'un tampon imprégné d'encre sur un papier humide. Travail accompli par Munkhtulga Rinchenkhorol sur la stèle n° 21 du Haut Tamir, site de Tsatsyn Ereg, Mongolie. Ph. J. Magail.

I.- PRÉSENTATION

Lors de ses missions archéologiques l'équipe du Musée d'Anthropologie préhistorique de Monaco a utilisé les techniques de la photogrammétrie afin de documenter l'art rupestre, les zones fouillées et aussi, afin de réaliser des modèles numériques de terrain permettant d'étudier précisément la topographie. En ce qui concerne les roches et les stèles gravées, l'exercice a été particulièrement riche et varié en raison de la diversité des vestiges. Il s'agissait de tester les possibilités de ce nouvel outil, non seulement pour la recherche archéologique, mais aussi pour une application dans les domaines de la conservation et de la muséographie. Il y a en effet, souvent un besoin urgent de relever un art rupestre en danger. Dans le monde entier, ce patrimoine culturel subit des dégradations naturelles ou anthropiques. Le délitement des roches avec l'érosion naturelle, mais également les conséquences souvent désastreuses du tourisme de masse, le développement socio-économique, avec la construction de routes, de barrages, les exploitations minières et les carrières, engendrent souvent des désordres irréversibles. Parfois, la dégradation est intentionnelle ou même organisée pour le trafic illicite de ces biens culturels (UNESCO, 2006).

Même si un art rupestre n'est pas potentiellement menacé, sa documentation, aussi complète que possible, est essentielle pour étudier sa signification, la combinaison des figures représentées, ainsi que leur évolution stylistique à travers l'espace et le temps. En fait, la diversité des arts rupestres est telle qu'un travail d'inventaire le plus exhaustif possible est essentiel si l'on veut mieux comprendre les vestiges des sociétés passées qui témoignent de leur conception du monde, de coutumes et de croyances. En outre, les objets documentés dans cet article appartiennent à des sites déjà inscrits sur la liste indicative du patrimoine mondial de l'UNESCO[1], ou vont y être intégrés. Aussi, la collecte des informations relatives à chaque monument s'avère indispensable en cas de dégradation ou de vol pour reconnaître tout ou partie des objets. Aujourd'hui, seuls les relevés et les photographies permettent d'identifier un artefact.

Plusieurs méthodes existent pour relever l'art gravé :

– la technique du calque, consiste à recouvrir de feuilles transparentes la roche ou la stèle et à tracer les contours des gravures avec un feutre (fig. 1) ;

– la technique de l'estampage, consiste dans un premier temps à prendre l'empreinte des gravures avec un papier spécial, et dans un deuxième temps à rehausser avec de l'encre afin de faire ressortir les aspérités du support. La technique la plus ancienne d'estampage remonte à la Haute Antiquité. Elle est réalisée en appliquant un papier humide sur la roche, suivi de l'utilisation d'un tampon en tissu imprégné d'encre (fig. 2) et (fig. 3) ;

– la technique du papier carbone, plus moderne, consiste à fixer le papier avec du ruban adhésif sur la pierre sans l'humidifier et à le frotter avec un papier carbone (fig. 4 et 5).

Que les archéologues relèvent les gravures à l'aide d'une feuille transparente ou bien grâce à l'estampage, ces méthodes sont efficaces dans les cas les plus simples, notamment lorsque la surface du support gravé est suffisamment régulière pour plaquer convenablement le plan de la feuille. Il s'agit notamment des techniques d'estampage réalisées par les épigraphistes sur des surfaces planes (fig. 6).

1. http://whc.unesco.org/en/tentativelists/5953/

Fig. 3

Papier en train de sécher après estampage, stèle n° 21 du Haut Tamir. Ce type de techniques nécessite aussi de bonnes conditions météorologiques sans vent. On remarque les pierres posées sur le papier pour l'empêcher de s'envoler. Ph. J. Magail.

Fig. 4

Estampage avec papier carbone réalisé par Yury Esin sur la stèle n° 68 du Haut Tamir, Mongolie. Ph. R. David.

Fig. 5

Détail d'un estampage réalisé par Yury Esin sur la stèle n° 14 du site d'Ulan Uushig, Mongolie. Ph. Y. Esin.

Fig. 6

Type d'estampage de stèles aux surfaces planes, à l'aide d'un tampon imprégné d'encre, Forêt des stèles, Musée lapidaire de Xi'an, Chine. Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Forêt_de_stèles.

Fig. 7

Photographie prise au lever du soleil en lumière rasante pour faire ressortir les gravures d'une seule face de la stèle n° 35 du Haut Tamir, site de Tsatsyn Ereg, Mongolie. Ph. J. Magail.

Bien que très pratiques pour un archéologue qualifié, ces techniques présentent quelques inconvénients lorsque la surface gravée n'est plus plane mais comporte de multiples angles ou arrondis. Le tracé obtenu à l'échelle 1:1 doit être ensuite scanné ou photographié sur place (fig. 5). Si la taille ou la forme de la roche gravée ont nécessité plusieurs calques, il peut être nécessaire de les assembler avant de retravailler l'image composite avec un logiciel. Tout ce processus est extrêmement long et peut conduire à des distorsions fastidieuses à éliminer, sachant que la dernière étape devrait correspondre à une vue orthogonale de la surface gravée. En outre, la géométrie tridimensionnelle des supports gravés ou sculptés n'est pas ou très mal restituée. Pourtant, elle contient des informations permettant l'étude approfondie des techniques de gravure et de sculpture, ainsi que l'analyse des typologies des figures. Une bonne restitution tridimensionnelle peut même permettre de tester des hypothèses sur les rapports chronologiques entre l'exécution de plusieurs gravures situées sur une même roche. Enfin, les méthodes traditionnelles décrites ci-dessus impliquent nécessairement un contact physique, potentiellement dangereux pour les surfaces gravées les plus fragiles, de sorte que dans la plupart des pays ces opérations ne peuvent être effectuées sans l'aval des autorités compétentes en charge de la conservation du patrimoine. L'usage de la photographie pour documenter l'art rupestre évite cette dernière question du contact avec l'objet, et quelques problèmes de projection géométrique, bien qu'elle implique une distorsion de perspective. La discrimination des surfaces gravées est souvent impossible sur simple cliché. En effet, l'hétérogénéité de la texture pétrographique du support et la faiblesse du contraste de couleur peuvent être des obstacles à la documentation photographique des parties sculptées ou gravées. Un éclairage présentant un fort angle d'incidence est généralement recherché, que ce soit dans les conditions naturelles en choisissant de manière adéquate l'heure de la prise de vue (coucher ou lever du soleil) (fig. 7), ou en utilisant un éclairage artificiel (flash, boîte à lumière ou réflecteurs) correctement positionné durant la nuit.

Les deux solutions peuvent s'avérer très contraignantes de façons opérationnelles, car sujettes aux aléas météorologiques et techniques. Dans les situations les plus favorables, la partie gravée est clairement visible car elle contraste avec la couleur du support. L'inscription est souvent le réceptacle de poussières, ou bien la surface de la roche étant plus oxydée, elle est en contraste avec des gravures plus claires (fig. 8). Les missions archéologiques du Musée d'Anthropologie en Mongolie et en Sibérie ont aussi pratiqué la prise d'empreintes de gravures rupestres à l'aide de silicone liquide adapté à ce type de support. L'empreinte, capable de prendre des détails de l'ordre du centième de millimètre, constitue le relevé physique négatif le plus précis qu'il soit possible d'obtenir (fig. 9 et 10).

La logistique nécessaire à cette technique est cependant très lourde, surtout si la totalité de la roche doit être reproduite : pour obtenir une copie en résine tridimensionnelle il est impératif de faire un coffrage qui devient le berceau de la couche de silicone.

◂ Fig. 8

Photographie d'une roche naturelle ornée sur laquelle les gravures sont plus claires car leur surface est moins oxydée que le support, site de Tsatsyn Ereg, Mongolie. Ph. J. Magail.

Fig. 9

Moulage par René David d'une face plane d'une roche gravée de Tsatsyn Ereg à l'aide d'une couche de silicone armée d'une toile. Ph. J. Magail.

Fig. 10

Copie en résine d'une roche gravée de Tsatsyn Ereg réalisée par René David à l'aide d'une couche de silicone. Ph. J. Magail.

Fig. 11

Copies en résine des stèles n° 32, 33 et 35 de la vallée du Haut Tamir (Tsatsyn Ereg) réalisées par René David et exposées au Musée de l'Institut d'Histoire et d'Archéologie de l'Académie des Sciences de Mongolie. Ph. J. Magail.

Fig. 12

Copie en résine de la plus grande stèle (n° 38) de la vallée du Haut Tamir (Tsatsyn Ereg) réalisée par René David et exposée au Musée national d'Oulan-Bator. Ph. J. Magail.

Aussi, il est apparu qu'il fallait explorer les solutions offertes par les nouvelles technologies dans le domaine de la modélisation d'objets réels en trois dimensions, associée à son traitement mathématique. Plusieurs procédés semblent a priori adaptés à la documentation de l'art rupestre, tels que les scanners tridimensionnels sans contact utilisant soit une lumière structurée, soit un faisceau laser. En général, de tels dispositifs sont très onéreux et mieux adaptés à des objets de moins d'un mètre. Ils ont besoin d'énergie électrique, d'un étalonnage, d'un contrôle informatique et ne fonctionnent pas très bien sous la lumière directe du soleil, ce qui peut entraîner de sérieux problèmes logistiques. Bien qu'ils aient été occasionnellement utilisés pour l'acquisition d'art rupestre, ils ne sont probablement pas les plus adaptés au travail de terrain en plein air dans des contrées éloignées. À l'opposé, la technique photogrammétrique dite « Structure from Motion » présente un faible coût d'exploitation, tout en étant très polyvalente sur le terrain. La géométrie de la scène, les positions des caméras et les angles des prises de vues sont reconstitués simultanément. La superposition des images prises selon différents points de vue doit néanmoins être importante, de l'ordre de 70 % à 80 % (Westoby *et al.*, 2012). À partir de quelques dizaines d'images capturées en quelques minutes, une scène complexe peut être modélisée en très haute définition en fonction, entre autres, de la résolution du capteur de l'appareil, de la focale utilisée, et de la distance entre l'appareil photo et l'objet. Une fois la géométrie reconstituée, un traitement destiné à isoler les parties gravées doit être appliqué au modèle 3D. Pour cette étape, des solutions issues du domaine de l'analyse spatiale en géographie / géomorphologie (Computational Geography) existent. Il s'agit simplement de considérer que la pierre correspond à un paysage sur lequel les parties gravées représentent des vallées et les parties saillantes des sommets (Monna *et al.*, en préparation). En ce qui concerne les fac-similés en résine, qui sont utilisés aussi bien pour la recherche que pour la muséographie (fig. 11 et 12), il faut certainement commencer à penser leur remplacement par des solutions numériques issues de la photogrammétrie.

Le choix de recourir au relevé photogrammétrique sur le terrain nécessitait une comparaison avec une autre méthode afin d'éprouver ce nouvel outil et de mesurer ses avantages et ses inconvénients avant de l'appliquer plus systématiquement. La technique de l'estampage avec un papier spécial sur lequel un carbone est frotté est apparue comme la plus élaborée pour subir une confrontation avec la photogrammétrie. En effet, ce type d'estampage fait apparaître les nombreux détails gravés, même ceux qui sont difficilement perceptibles ou invisibles à l'œil nu (fig. 4 et 5). Cette méthode est plus efficace que le simple tracé des contours des gravures sur une feuille transparente. Elle exige cependant une expérience et un savoir-faire particulier pour obtenir des relevés uniformes de la totalité des surfaces étudiées. Il est à noter que la restitution de l'objet orné nécessite l'usage de la photographie des relevés obtenus par frottement.

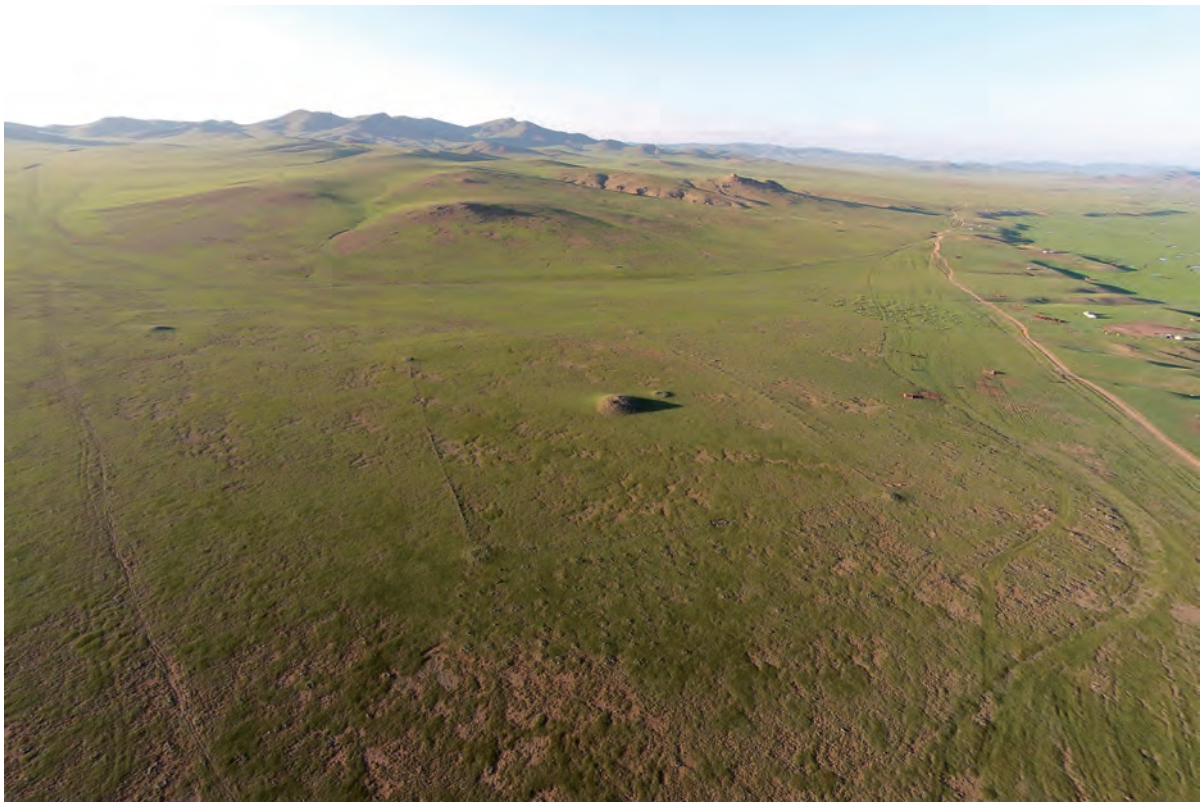


Fig. 13

Vue aérienne du complexe B10 de Tsatsyn Ereg prise à l'aide d'un drone en fin de journée. Ph. J. Magail.

L'acquisition par photogrammétrie a été utilisée pour la réalisation des modèles de terrain tridimensionnels correspondant souvent à des surfaces où sont présentes des stèles ornées, des roches gravées et des fouilles archéologiques. La raison principale est de garder une cohérence technique pour toutes les opérations de traitement des données. À l'échelle d'un site archéologique de plusieurs hectares les photographies sont réalisées à l'aide d'un drone équipé d'un GPS et de sa propre caméra HD. De plus, le déplacement de l'appareil et le déclenchement des prises de vues géoréférencées sont programmables. En ce qui concerne le choix de cette technologie pour créer des modèles tridimensionnels, les arguments sont identiques à ceux déjà donnés pour la documentation de l'art rupestre. Le faible coût d'un drone et le peu de logistique qu'implique son utilisation, surtout dans le cadre de terrains très éloignés, plaident pour ce type de photogrammétrie aérienne. Il est à noter que le milieu ouvert des steppes de Mongolie se prête particulièrement bien à cette méthode (fig. 13). Lors de la campagne 2016, le complexe funéraire B10 du site de Tsatsyn Ereg, constitué de plus de 2000 structures en pierres sèches (tertres, cercles et alignements), a été modélisé (fig. 14).

Enfin, dans le cadre du programme de la restauration de l'ensemble monastique bouddhiste de la ville de Tsetserleg, les photographies aériennes (drone) ont été utilisées pour construire des modèles tridimensionnels de bâtiments dont l'architecture est relativement complexe (Charleux, 2016).

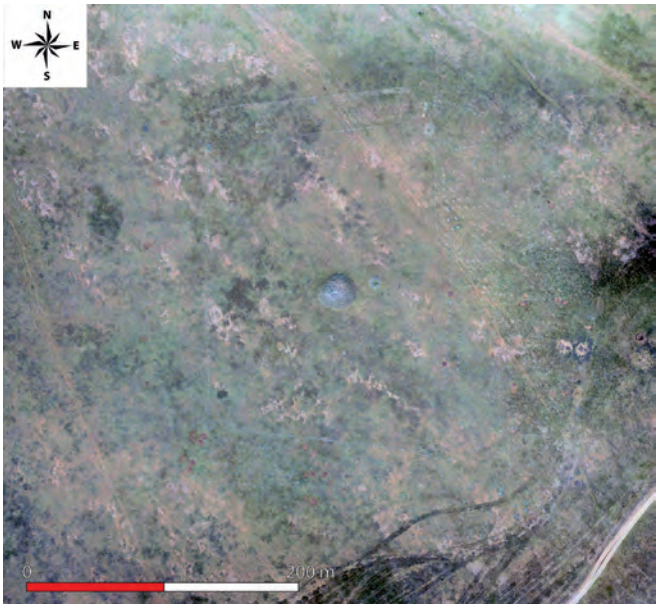


Fig. 14

Orthophotographie du complexe B10 de Tsatsyn Ereg réalisée à partir de 93 photos prises à l'aide d'un drone DJI. Ph. & DAO J. Wilczek.

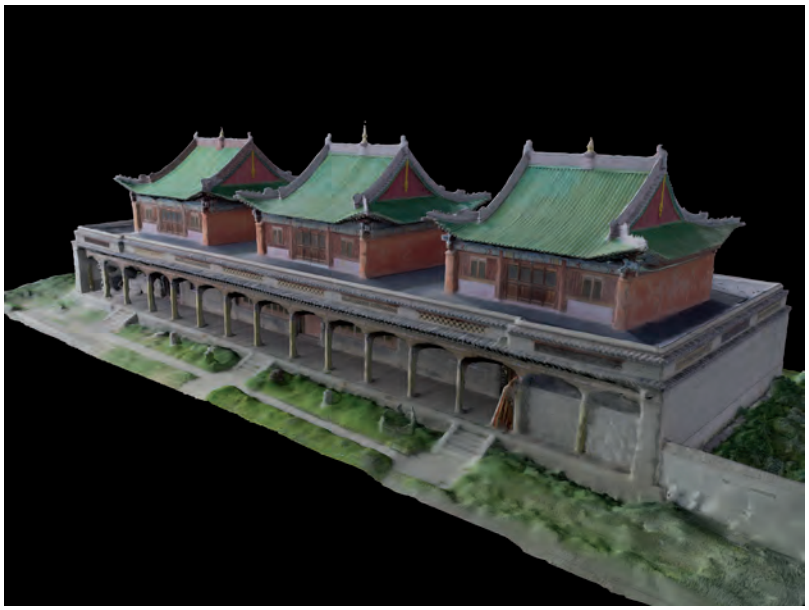
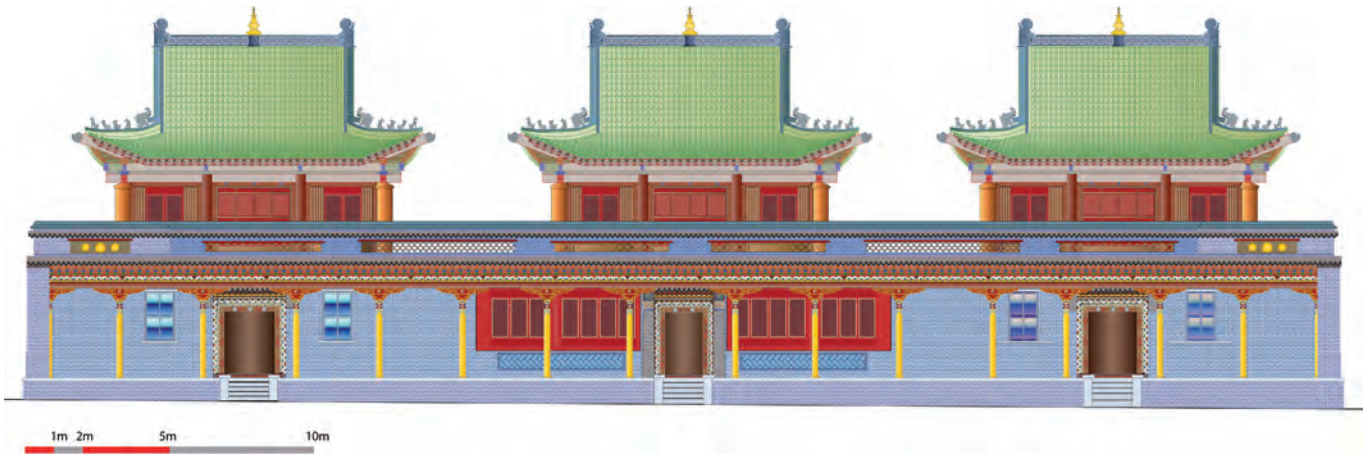


Fig. 15

Modèles 3D du bâtiment Güden Süm (nord) du monastère bouddhiste de la ville de Tsetserleg. Photogrammétrie réalisée à partir de prises de vue à l'aide d'un drone. Ph. & DAO J. Wilczek.

Fig. 16

Plan du bâtiment Güden Süm. DAO N. Markova.



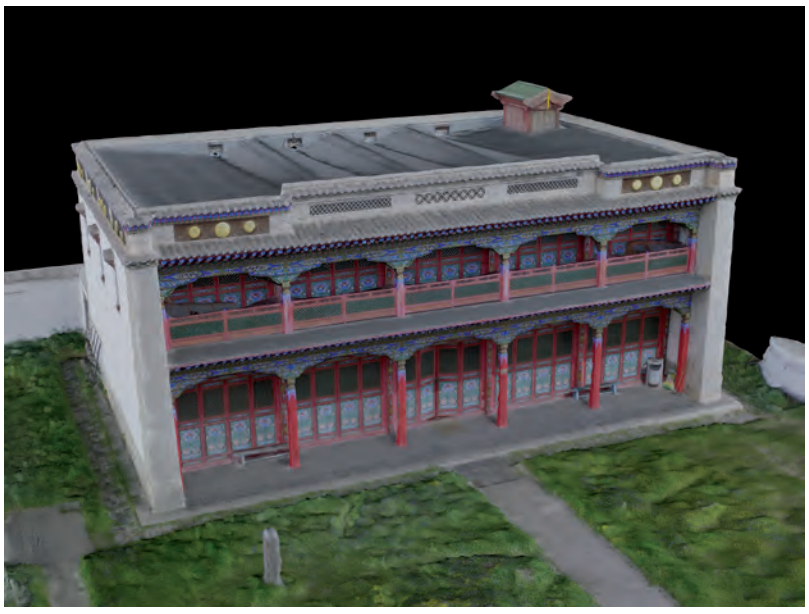


Fig. 17

Modèles 3D du bâtiment Semchin (est) du monastère bouddhiste de la ville de Tsetserleg réalisés à partir de prises de vue à l'aide d'un drone. Ph. & DAO J. Wilczek.

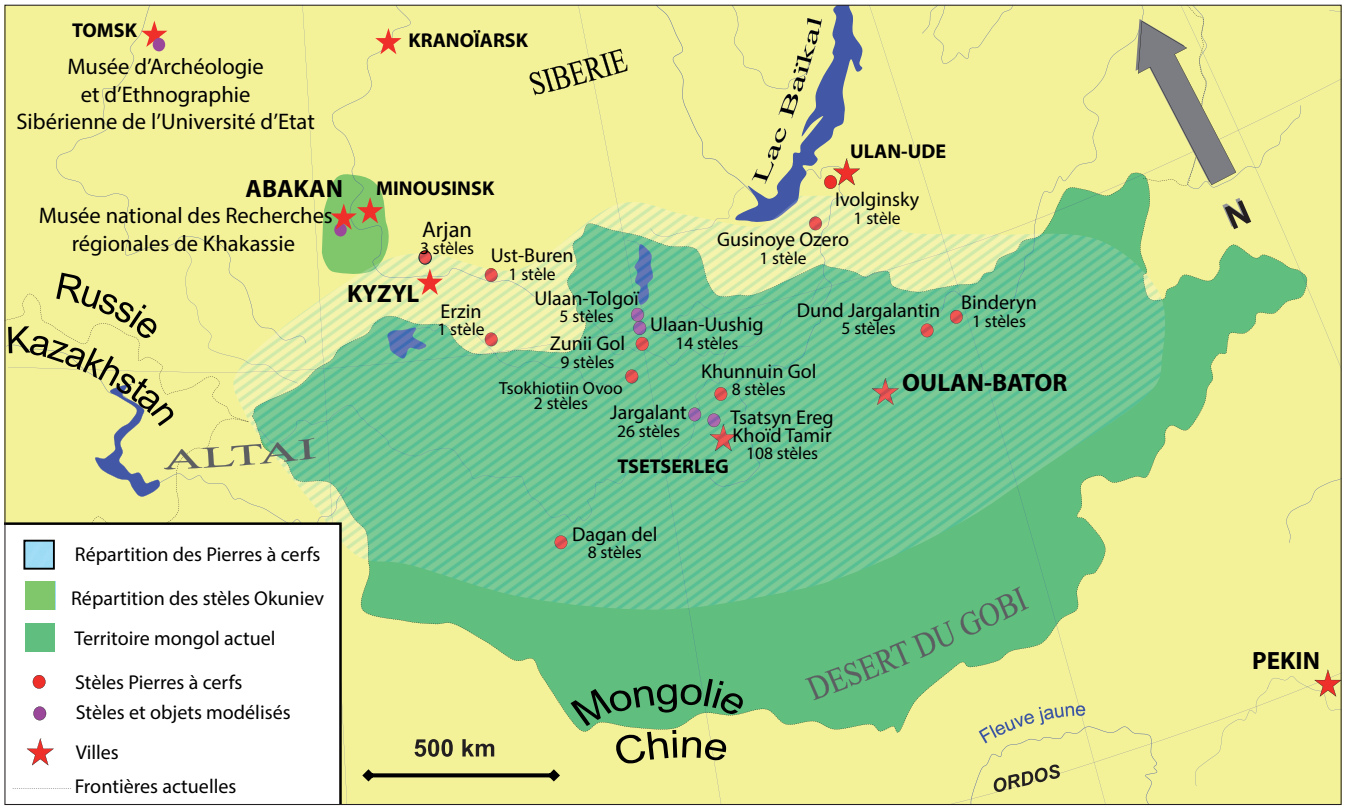


Fig. 18

Carte des principaux sites archéologiques à stèles ornées et des lieux où la mission a utilisé la photogrammétrie. Ill. J. Magail.

Bien que la configuration des toitures, des galeries et des coursives présente de nombreuses ouvertures, la modélisation fonctionne très bien (fig. 15). Un des avantages du drone est sa capacité à voler à proximité du sol et des bâtiments pour compléter les prises de vue de la couverture verticale. L'acquisition de la totalité des photographies est rapide et le modèle 3D enrichit considérablement les plans réalisés par les architectes (fig. 16). Le plaquage des textures joue pleinement son rôle pour replacer les éléments iconographiques (fig. 17).

II.- OBJETS MODÉLISÉS ET MÉTHODES

A - Typologie des objets modélisés

Le travail le plus important a été accompli en Mongolie lors des campagnes estivales de 2015 et de 2016 dans le cadre de la Mission archéologique conjointe Monaco-Mongolie (fig. 18). Les modélisations de 63 stèles ornées réparties sur 4 sites (22 à Tsatsyn Ereg, 14 à Ulaan Uushig, 4 à Ulaan Tolgoi et 23 à Jargalant), de 4 zones fouillées (stèle n° 109, atelier métallurgiste, tombes n° 207 et 221), de 5 modèles de terrain (situation de la stèle n° 39, complexes funéraires de Chirvertyn Am et B10, site d'Avdar Khad, site à gravures rupestres de Khuruugiin Uzuur) ont été réalisées. Une grande partie de la campagne 2016 a été consacrée à l'acquisition des orthophotographies et à la préparation de modèles 3D de terrain couvrant plus de 1200 hectares de la nécropole de Tsatsyn Ereg. Enfin, une opération a été menée sur l'ensemble architectural du monastère bouddhiste de la ville de Tsetserleg. Dans le cadre de la coopération entre le Musée d'Anthropologie de Monaco et l'Institut de Recherche sur les Langues, la Littérature et l'Histoire de la république de Khakassie, 12 stèles ornées de la culture Okuniev conservées à Abakan et 1 roche gravée dans la steppe ont été modélisées. Dans un autre registre d'objet décoré, une défense de mammouth conservée au Musée d'Archéologie et d'Ethnographie Sibérienne de l'Université d'Etat de Tomsk, comportant des gravures d'animaux, a aussi fait l'objet d'une modélisation par photogrammétrie. Enfin, des essais ont été effectués avec plusieurs roches gravées de la Vallée des Merveilles (Alpes-Maritimes, France) dans le but de comparer les résultats avec ceux obtenus en Mongolie et Sibérie.

B - Les stèles de type « pierres à cerfs » de Mongolie

En ce qui concerne les monuments ornés de Mongolie, il s'agit de stèles de l'âge du Bronze dites « pierres à cerfs », en raison des cervidés gravés sur leurs faces. Les animaux sont représentés en mouvement, en train de bondir, selon la typologie de l'art scytho-sibérien bien connu chez les peuples nomades de haute Asie (fig. 19). Ils ont souvent une trajectoire circulaire ou hélicoïdale autour du monument, donnant ainsi une impression de tourbillon vers le ciel peut-être figuré par les deux cercles gravés au sommet des stèles, le soleil et la lune selon les archéologues mongols. Pour d'autres, chaque face est ornée d'une horde de cerfs qui monte ou descend. Des gravures

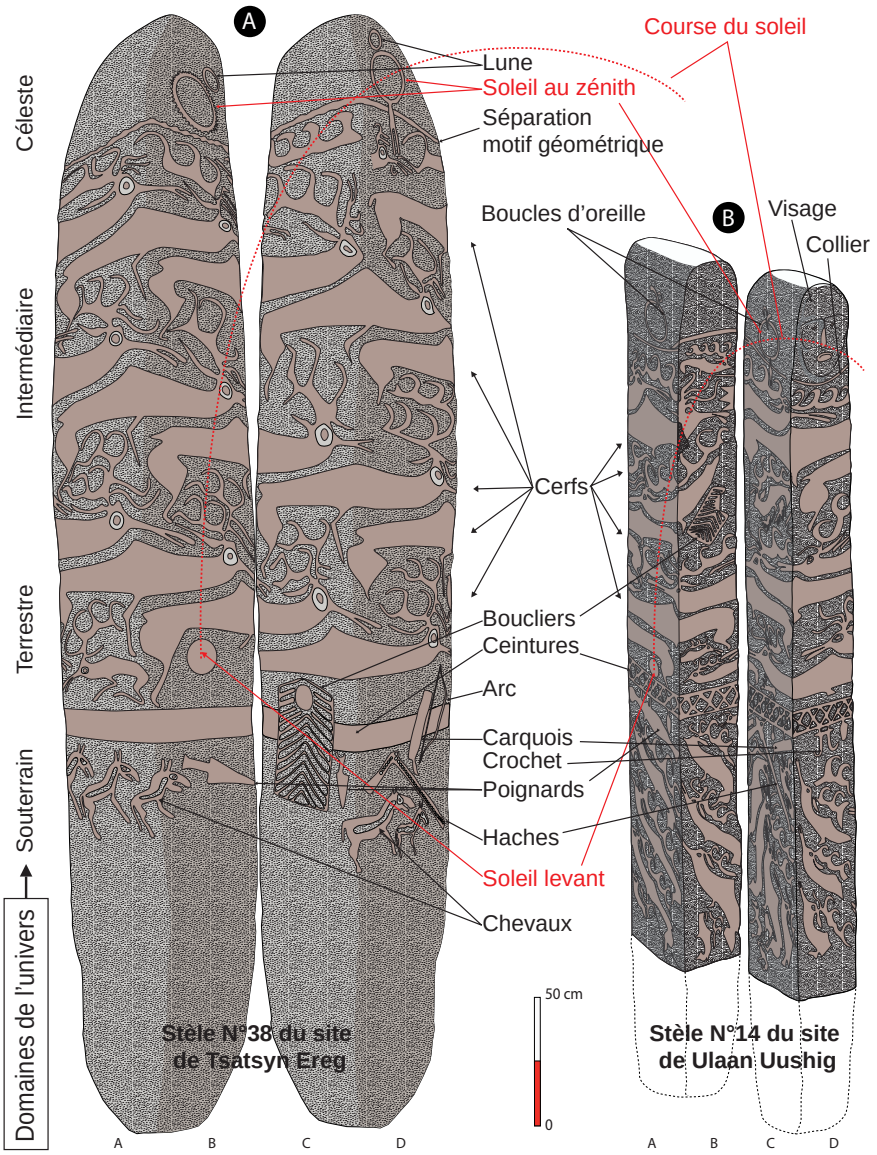


Fig. 19

Stèle n° 38 du site de Tsatsyn Ereg et stèle n° 14 du site d'Ulaan Uushig, séparées par 240 km à vol d'oiseau. D'après Magail, 2015b.

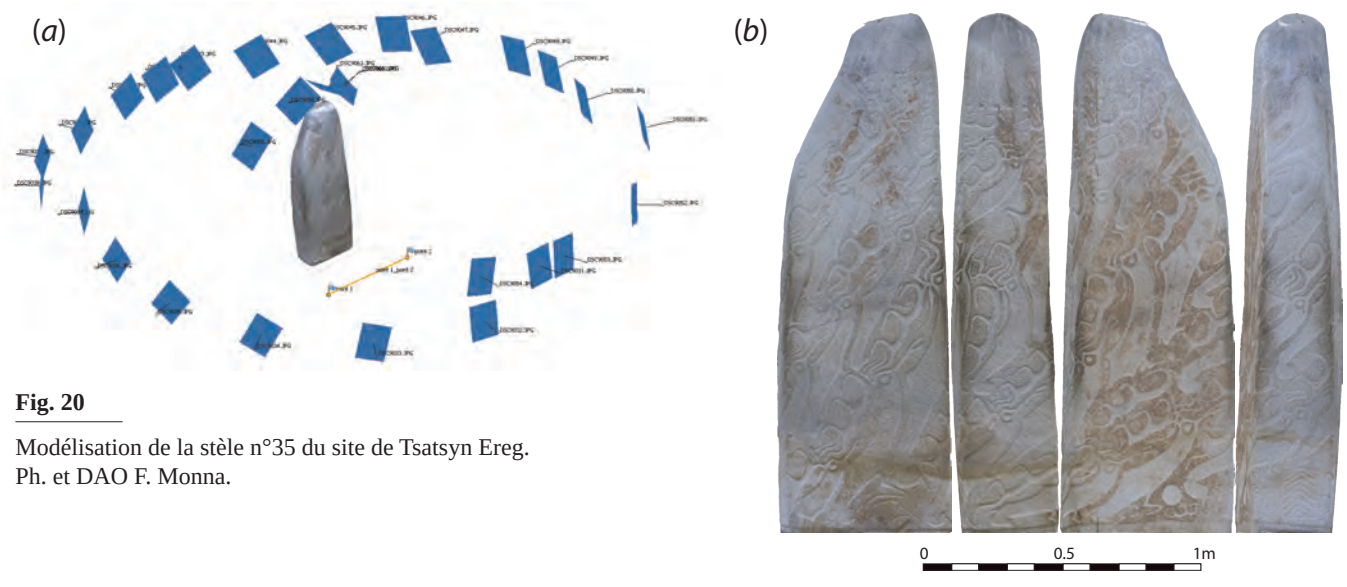


Fig. 20

Modélisation de la stèle n°35 du site de Tsatsyn Ereg. Ph. et DAO F. Monna.

Fig. 21

Vue du modèle 3D de la pierre à cerfs n° 35. La manipulation de la stèle modélisée peut se faire avec tous les logiciels 3D. L'opérateur explore ainsi l'ensemble de l'objet grâce à des rotations, des translations et des zooms. Ill. F. Monna.

Fig. 22

Relevé de la pierre à cerfs n° 35 de la vallée du Haut Tamir. Ill. Y. Esin.

d'armes et de figures géométriques sont associées à celles des animaux. Ces monuments dont 90 % sont en granite et 10 % en quartzite (grès silicifié) ont fait l'objet d'études et d'inventaires (Volkov, 2002 ; Takahama *et al.*, 2006 ; Fitzhugh *et al.*, 2008 ; Magail, 2008 ; Turbat *et al.*, 2011 ; Gantulga, 2016). Ils sont associés à de multiples structures funéraires et rituelles composées de tumulus, de tertres et de cercles de pierres (Magail *et al.*, 2010). Près d'un millier de stèles sont dispersées sur le territoire de la Mongolie (95 %) et de la Russie (5 %), 108 d'entre elles ont été répertoriées par la mission dans la vallée du Haut Tamir (voir carte fig. 18).

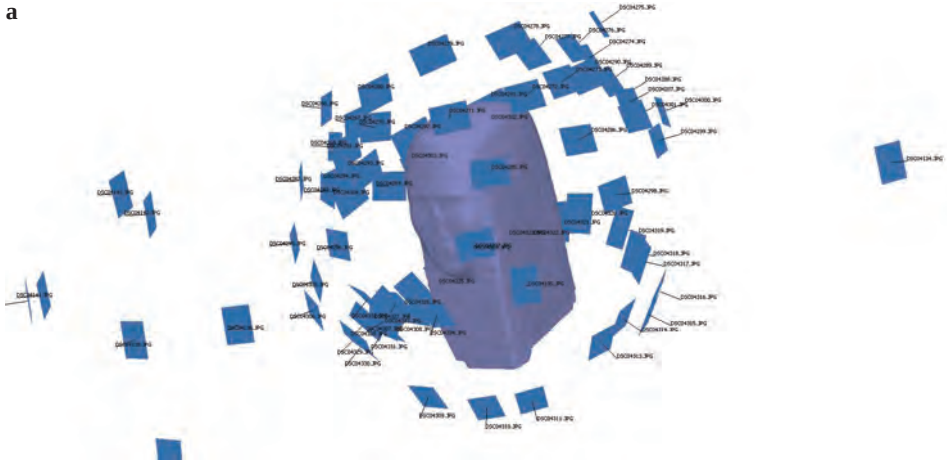
La procédure de modélisation par photogrammétrie débute avec la capture d'un ensemble d'images qui se chevauchent largement. Tous les points appartenant à la géométrie 3D de l'objet doivent apparaître au moins sur 3 photographies. En fonction de la taille des monuments, deux appareils différents ont été utilisés pendant cette étape. Lorsque la stèle était assez petite pour permettre à l'appareil d'être manipulé directement à la main, y compris pour photographier le sommet de la stèle, un NIKOND800 plein format a été privilégié, avec des objectifs à focales fixes NIKKOR 24 mm ou un NIKKOR 50 mm. Ces derniers produisent des images extrêmement nettes avec peu de distorsion. Les clichés des côtés des pierres à cerfs ont été pris à hauteur d'homme en tournant autour de la stèle (fig. 20a). Pour une stèle dépassant 1,5 m de hauteur, un appareil compact expert SONY DSC-RX100 MIII (24-70 mm en équivalent au 24 x 36 mm) a été utilisé avec sa focale bloquée en position grand angle à 24 mm. Pour atteindre la partie sommitale, l'appareil a été monté sur perche télescopique de 4 m (Rode) et contrôlé par WiFi en utilisant une tablette Samsung Galaxy, fixée elle-même sur la perche au niveau de l'opérateur. L'ouverture a été maintenue à f/8 pour assurer la netteté de toutes les images, à savoir une profondeur de champ et une vitesse suffisante afin d'éviter l'utilisation d'un trépied. Pour redimensionner le modèle final à l'échelle, un mètre à ruban métallique ouvert à 1 mètre, a été systématiquement placé au pied de la stèle afin d'être sur les clichés. Les photographies ont été prises, autant que possible quand le ciel était couvert. Les nuages qui agissent comme diffuseurs de lumière, produisent un éclairage doux qui réduit les ombres. Ces conditions lumineuses facilitent grandement la reconstruction nette et détaillée d'un modèle 3D d'objets ornés, à l'opposé de la photographie archéologique traditionnelle qui cherche à obtenir des ombres dans des parties incisées. Il faut être attentif à ne pas photographier des éléments mobiles à l'intérieur de la scène au cours de la séance de photos, tels que des personnes ou des ombres portées.

Il est difficile de fournir le nombre minimum d'images nécessaires à une bonne reconstruction car il dépend fortement de la taille et de la forme de l'objet ciblé. Il faut cependant garder à l'esprit que le temps de calcul lors de l'étape de modélisation augmente de façon spectaculaire en fonction du nombre d'images traitées. Dans notre cas, 25-50 images seulement étaient nécessaires pour couvrir correctement les pierres à cerfs, en raison de leur géométrie convexe relativement simple. En comparant le modèle tridimensionnel (fig. 21) et le résultat du relevé traditionnel (fig. 22) on comprend l'intérêt de la photogrammétrie qui non seulement reconstitue la forme 3D de

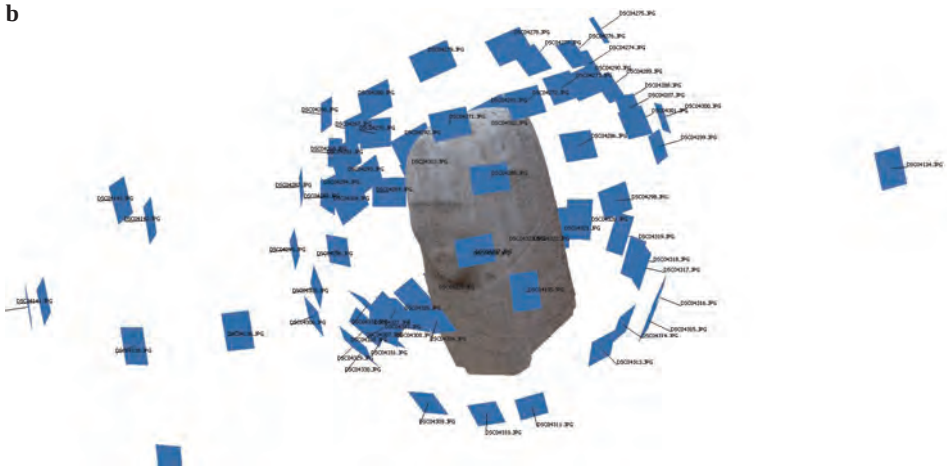
Fig. 23

Modélisation de la totalité de la stèle n° 14 du site d'Ulaan Uushig, Mongolie. Ph. et DAO F. Monna.

a



b



c

Fig. 24 a, b et c

Modélisation du sommet de la stèle comportant une face humaine sculptée. Monument n° 14 d'Ulaan Uushig. Ph. et DAO F. Monna.

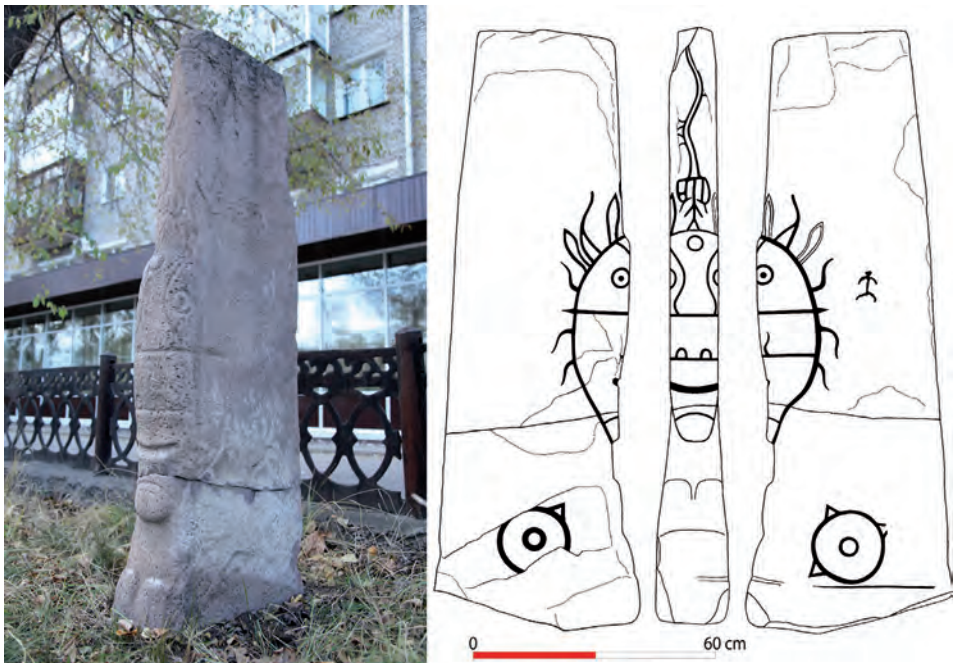


Fig. 25

Photo et relevé d'une stèle Okuniev située devant l'ancien Musée National d'Histoire Régionale de la République de Khakassie, Abakan. Ph. J. Magail, Relevé Y. Esin.

la stèle mais restitue également les profondeurs des gravures. En premier temps les images servent à retrouver les positions et les orientations de l'appareil photo dans l'espace. À partir de cette information, le nuage de points est généré, ensuite densifié et enfin utilisé pour créer le maillage triangulaire. Ensuite, la couleur d'origine est obtenue à partir des images combinées en une seule texture plaquée sur l'objet. La correspondance exacte entre les textures et les reliefs reconstitués est un atout supplémentaire qui peut augmenter la lisibilité de l'objet.

Deux modélisations ont été menées pour la stèle n° 14 du site d'Ulaan Uushig, une des plus célèbres pierres à cerfs de Mongolie (fig. 23). L'une a consisté à prendre l'ensemble du monument et l'autre le détail du sommet comportant un visage sculpté (fig. 24).

C - Les stèles ornées et sculptées de Sibérie

Une autre série de 12 stèles a été modélisée. Elles appartiennent à la culture Okuniev qui débute durant la deuxième moitié du III^{e} millénaire av. J.-C. et s'achève au début du II^{e} millénaire. Elles sont situées en République de Khakassie et dans la région du bassin de Minoussinsk (voir carte fig. 18). Près de 500 stèles ornées et plus de 40 roches gravées ont été répertoriées (Leontiev *et al.*, 2006 ; Esin, 2010). L'art Okuniev est composé de gravures et sculptures anthropomorphes ainsi que d'images d'animaux (fig. 25). Les figures peuvent s'étendre sur plusieurs faces des monuments. L'utilisation de la photogrammétrie prend tout son sens, notamment pour saisir les sculptures de visages anthropomorphes qui se développent sur trois faces (fig. 26).

Une partie importante des stèles de la culture Okuniev, d'une typologie assez variée, est conservée dans les musées, notamment le Musée National d'Histoire Régionale de la République de Khakassie. Certains monuments ne sont ornés que de gravures mais d'autres sont un subtil mélange de gravures et de sculptures parfois difficilement visibles en lumière naturelle (fig. 27). Les modèles tridimensionnels peuvent être exposés à différents types de lumières afin de faire ressortir les motifs (fig. 28 et 29).

Fig. 26

Vue du modèle 3D de la stèle. DAO F. Monna.

Fig. 27

Original de la stèle Okuniev modélisée. Ph. J. Magail.

Fig. 28

Détail d'une vue tridimensionnelle d'une stèle Okuniev. 40 clichés ont été nécessaires pour réaliser le modèle. DAO F. Monna.

Fig. 29

Détail d'une vue tridimensionnelle du visage sculpté d'une stèle Okuniev. DAO F. Monna.

D - Les roches gravées

1 - La roche gravée de Bolshaya Boyarskaya – Bassin de Minoussinsk - Russie

L'ensemble gravé de Bolshaya Boyarskaya a été modélisé grâce à plus de 150 clichés. Il s'agissait d'un véritable test de l'utilisation de la photogrammétrie pour documenter des pétroglyphes difficiles à distinguer sur ce grès où le fond des gravures a exactement la même teinte que la roche. Les clichés traditionnels doivent être exclusivement pris en lumière rasante pour obtenir un contraste suffisant entre la surface et les parties concaves (fig. 30). Aussi, le modèle 3D a non seulement permis de faire ressortir toutes les gravures mais après traitement leurs différences de profondeurs sont clairement visibles (fig. 31).

2 - Les roches gravées de la Vallée des Merveilles – Alpes-Maritimes - France

Sur les six roches modélisées de la Vallée des Merveilles, trois ont été choisies pour cet article. Le support est une roche sédimentaire à grain fin (pélite). Le premier ensemble gravé, celui nommé « l'Homme aux bras en zigzag », occupe un espace de 4 m sur 3 m (fig. 32). Il comporte plusieurs faces gravées dont il est difficile de rendre compte avec un relevé traditionnel (fig. 33). Or, la répartition des gravures ne s'est pas faite au hasard, elle a peut-être une signification dont certains paramètres sont l'orientation et la position du support.

La gravure dite du « Sorcier » est l'une des plus célèbres du Mont Bego (fig. 34). La composition de cette figure anthropomorphe armée de deux poignards est entourée d'autres pétroglyphes. Située sur une pélite polie par le déplacement des glaciers au Quaternaire, elle a été inscrite dans une encoche glaciaire dont le relief est très bien restitué par la photogrammétrie.

Le modèle en haute définition de la gravure dite du « Christ » est intéressant à étudier car il permet de visualiser le volume des cupules (fig. 35).

E - Les modèles de terrain

1 - Les modèles relatifs aux chantiers de fouilles

Les chantiers de fouille de différentes tailles peuvent être modélisés à partir du sol. L'appareil photographique et la perche utilisés pour documenter les stèles ont permis d'effectuer les clichés nécessaires à la modélisation par photogrammétrie de tombes comme la n°207 de la vallée du Haut Tamir (fig. 36). Toutes les étapes de la fouille font l'objet d'une couverture photographique qui permet de produire une série de modèles 3D qui restitue l'ensemble de l'évolution du chantier, du décapage de la tombe à l'ouverture de la fosse sépulcrale. Des chantiers bien plus grands ont également été modélisés avec la même méthode, notamment la fouille de la stèle n° 109 de la vallée du Haut Tamir (fig. 37 et 38).

Fig. 30

Photo de la roche de Bolshaya Boyarskaya prise au coucher du soleil afin de bénéficier d'une lumière rasante. Ph. J Magail.

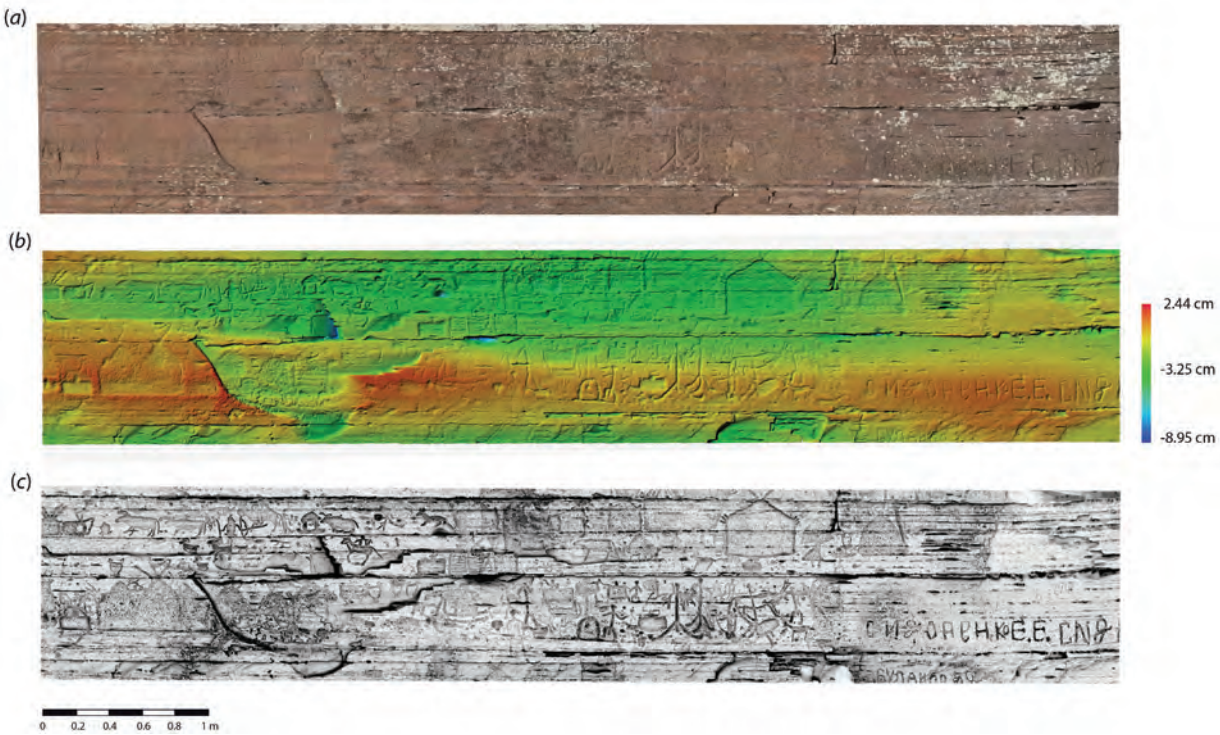


Fig. 31

Modélisation 3D à partir de 150 photos et traitement. (a) : orthomosaïque (résolution : 1 mm/pixel) ; (b) modèle numérique ombré (résolution : 1 mm/pixel), les différences d'élévation par rapport à un plan moyen sont représentées par une échelle de couleurs ; (c) traitement du modèle numérique par 'ciel visible'. DAO F. Monna.

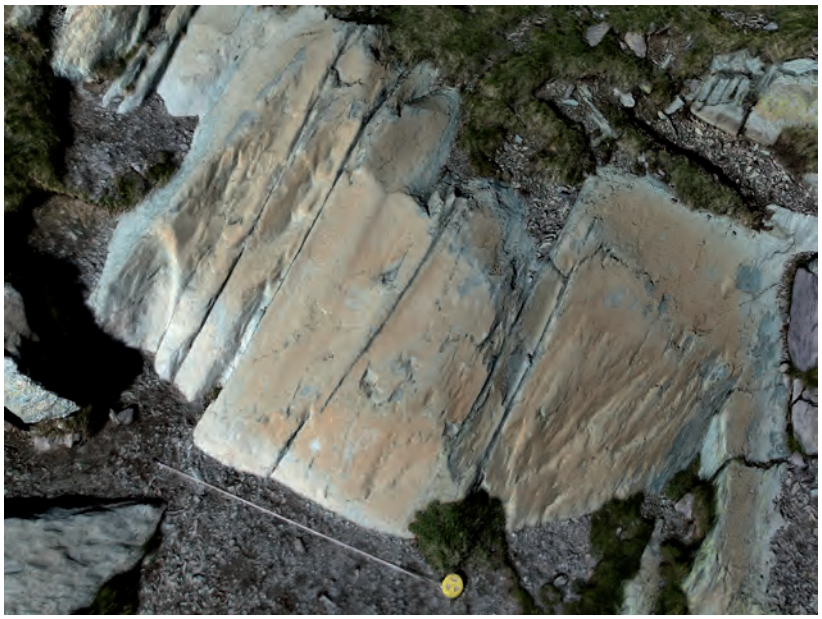


Fig. 32

Modèle tridimensionnel de la roche dite de « L'homme aux bras en zigzag ». Vallée des Merveilles, zone IV, Groupe III, roche 16D. Ph. et DAO J. Wilczek.

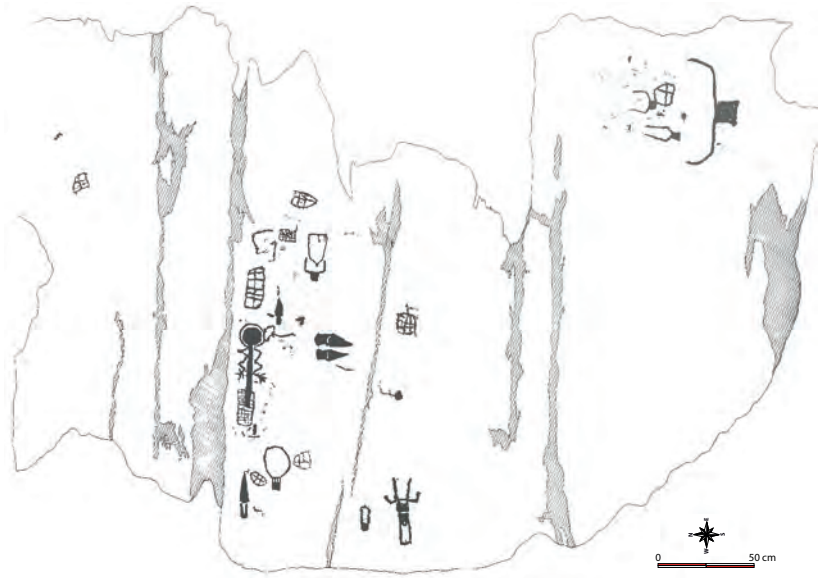


Fig. 33

Relevé de l'équipe archéologique du Laboratoire du Lazaret. Lumley *et al.*, 1995.

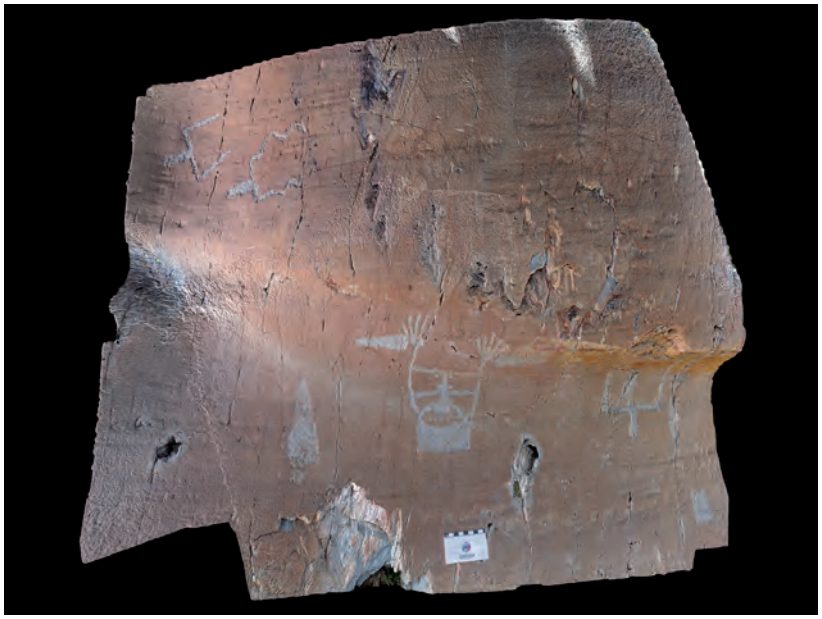


Fig. 34

Modèle tridimensionnel de la gravure dite du « Sorcier ». Ph. et DAO J. Wilczek.

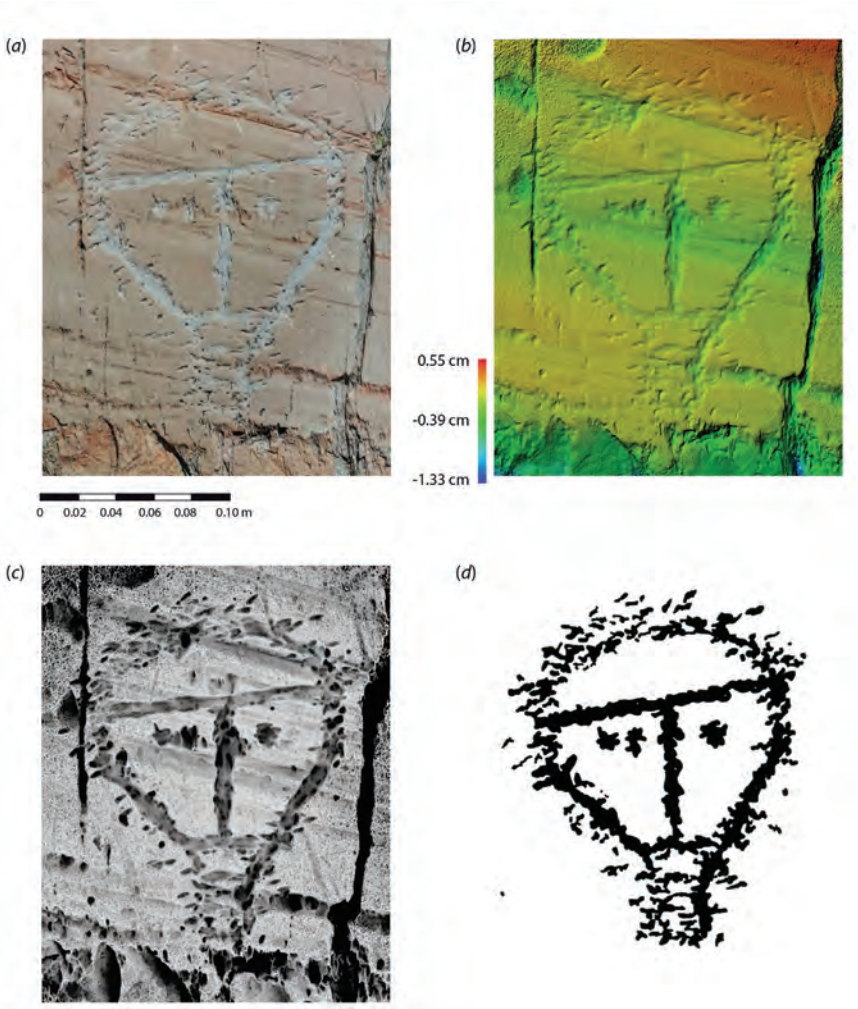


Fig. 35

Modélisation 3D à partir de 24 photos, traitement et comparaison avec la documentation existante. (a) : orthomosaïque (résolution : 0.0386 mm/pixel) ; (b) modèle numérique ombré (résolution : 0.2 mm/pixel), les différences d'élévation par rapport à un plan moyen sont représentées par une échelle de couleurs ; (c) traitement du modèle numérique par 'ciel visible' ; (d) documentation existante (Lumley, 1995). Ph. et DAO F. Monna.

Fig. 36

Premier modèle tridimensionnel du niveau 1 de la fouille de la tombe n°207 du site de la vallée du Haut Tamir, Mongolie. Ph. et DAO J. Wilczek.

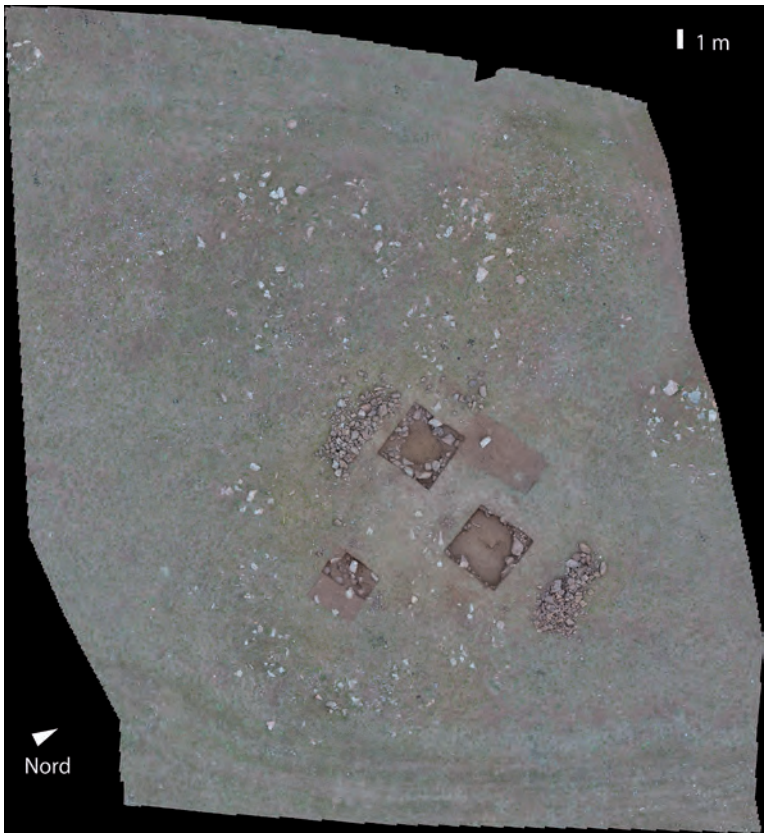


Fig. 37

Modèle tridimensionnel de la fouille de la stèle n° 109 dans son contexte environnemental, site de Tsatsyn Ereg, vallée du Haut Tamir, Mongolie. Ph. et DAO F. Monna.

Fig. 38

Prises de vue à la perche de la fouille de la stèle n° 109. Ph. A.C. Monna.

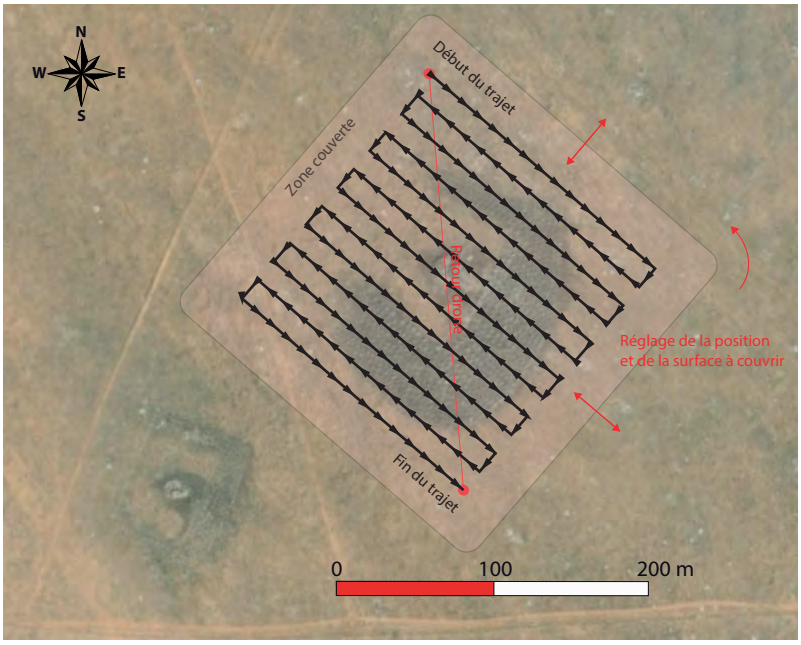


Fig. 39

Schéma du trajet automatisé (en boustrophédon) du drone au-dessus de structures archéologiques. Ill. J. Magail.

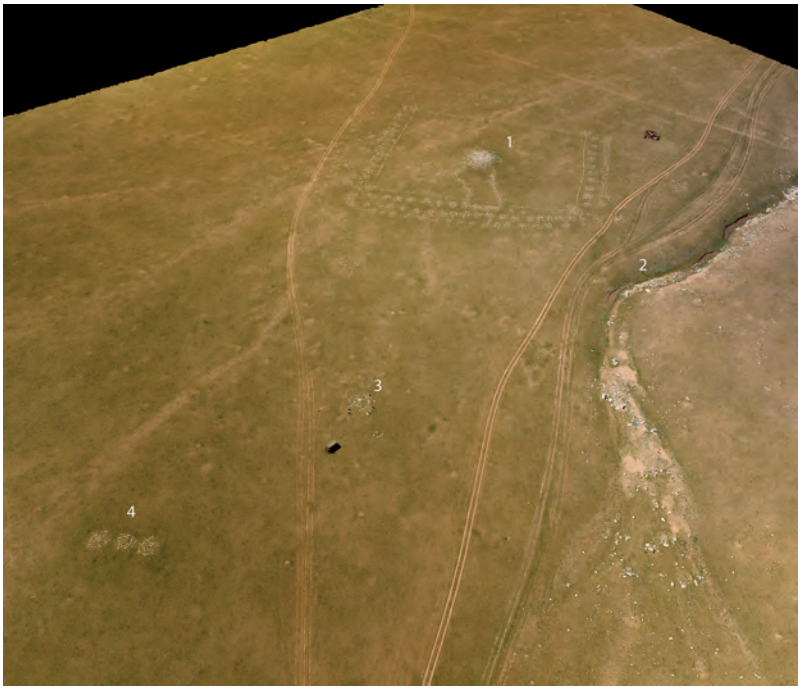


Fig. 40

Modèle tridimensionnel de terrain contenant un grand complexe funéraire (1), une carrière de stèles (2), la fouille de l'implantation de trois stèles (3) et trois tombes de la période turque (4), vallée du Haut Tamir, Mongolie. Drone et DAO J. Wilczek.

2 - Les modèles relatifs aux sites archéologiques

Dans le cadre des modèles de terrain de plus de 100 m de côté, peu couvert de végétation, le drone est une solution très efficace. Le matériel utilisé en Mongolie par la mission archéologique est un DJI Phantom 3 Advanced équipé de son GPS et de sa caméra à 12 millions de pixels muni d'un objectif f/2.8 offrant un champ de vision à 94°. Presque toutes les distorsions optiques que les caméras des modèles précédents comportaient sont éliminées sur le Phantom 3.

La programmation de l'itinéraire du drone se fait grâce à une application très conviviale (Altizure) qui permet de positionner le trajet quadrangulaire du vol sur la zone voulue grâce à la photo satellite (fig. 39). L'opérateur doit simplement régler l'altitude, la taille et l'orientation de la zone d'intérêt, et la densité du maillage (via le pourcentage souhaité de recouvrement entre les prises de vues). Si la zone couverte est grande, en fin de batterie, le drone revient sur son lieu de décollage, la batterie est changée, puis le plan de vol reprend là où il s'était arrêté. Le modèle numérique de terrain et l'orthomosaïque sont ensuite créés à partir du jeu de vues verticales.

Plus le drone est bas, plus les photos capturent les détails du terrain, augmentant ainsi la résolution au sol. Bien entendu, le champ de vision se restreint. Il faut donc trouver un compromis entre la résolution recherchée et l'étendue de la zone à couvrir. À l'altitude de 100 m l'appareil photo permet de distinguer un objet d'environ 5 cm (fig. 40).

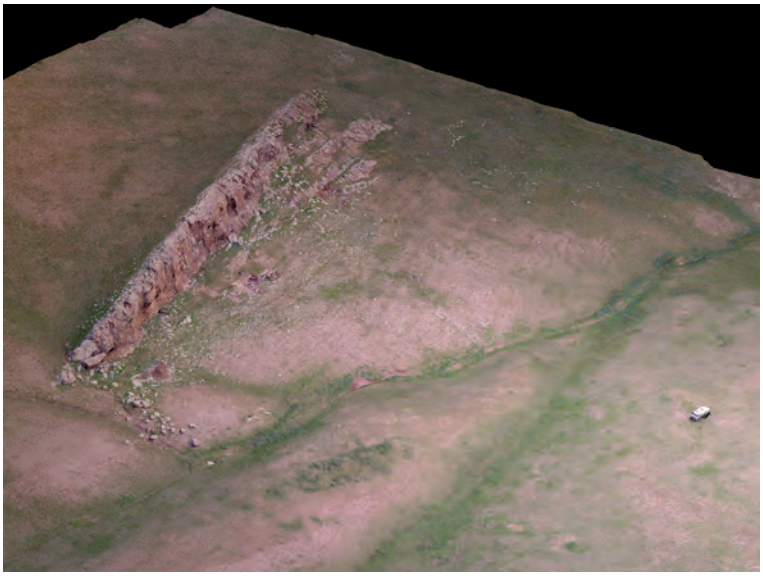


Fig. 41

Modèle tridimensionnel de terrain présentant une falaise d'où a été extrait du minerai de fer, la fouille d'un atelier de métallurgiste et la fouille d'un site paléolithique, vallée du Haut Tamir, Mongolie. Drone et DAO J. Wilczek.

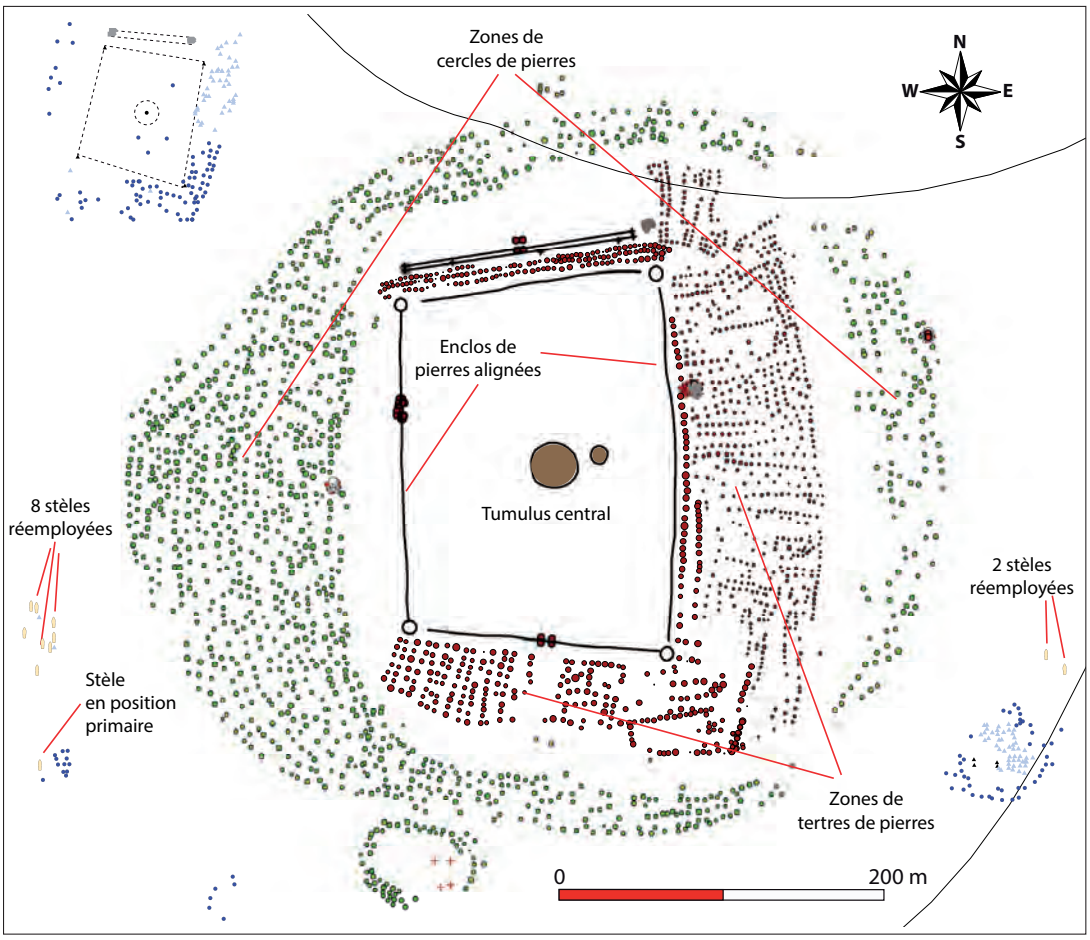


Fig. 42

Plan du complexe B10 de Tsatsyn Ereg réalisée à l'aide d'une station totale par Yannick Molland et Benjamin Bohard. Deux campagnes de 1 mois chacune ont été nécessaires pour réaliser le plan. Le tumulus central en marron n'a pas été fouillé mais d'après les autres fouilles il contient toujours un seul individu de haut rang. Sous chaque tertre en rouge une tête de cheval a été déposée. Les cercles de 8 pierres en vert contiennent de petits fragments d'os brûlés (ovicaprinés). Les stèles « pierres à cerfs » qui faisaient partie du complexe étaient implantées dans la périphérie du complexe sur des monticules artificiels de sable eux-mêmes constellés de tertres et de cercles de pierres.

Le site d'Avdar Khad de la vallée du Haut Tamir est fouillé en deux endroits par la mission archéologique conjointe Monaco - Mongolie (fig. 41).

La modélisation 3D du complexe funéraire B10, à partir de 93 photos réalisées au drone à une altitude de 120 m au-dessus des structures, a permis un traitement et une comparaison avec la documentation existante. En effet, la zone d'environ 9 hectares avait déjà été relevée à l'aide d'une station totale 8 ans auparavant (fig. 42). Il fut donc facile de comparer l'ancien relevé au résultat obtenu par drone notamment sur les questions de précision et de fiabilité de l'identification des structures. À partir d'un logiciel SIG la photogrammétrie aérienne apparaît non seulement précise mais elle peut éviter certaines erreurs humaines rencontrées lors des relevés topographiques de zones très denses en structures anthropiques. De la programmation du vol au traitement des photos, le gain en termes de temps de travail et d'opérateurs sollicités défie toutes les autres technologies concurrentes. Une seule personne peut s'occuper de la photogrammétrie aérienne et tester dans la journée les modèles de terrain afin de détecter d'éventuels problèmes techniques et ainsi recommencer l'opération si cela s'avère nécessaire. Vingt minutes de vol suffisent pour couvrir une zone de 400 m de côté.

Les structures en pierres sèches de l'âge du Bronze et du début de l'âge du Fer, telles que celles du complexe funéraire B10, sont parfaitement visibles dans la steppe. Une couche d'arène granitique, issue de l'altération des reliefs, s'est certes déposée depuis 3 000 ans mais son épaisseur de 5 cm à 10 cm laisse dépasser les pierres même de petite taille. Les photographies aériennes idéales doivent être prises en plein été au moment où l'herbe est la plus rase et que la moindre pierre est visible du ciel. À partir des 93 prises de vue l'orthomosaïque (fig. 43), le MNT géoréférencé, coloré et ombré (fig. 44), et le traitement destiné à faire ressortir les structures (fig. 45) ont été produits.

III.- REMARQUES

Bien que des solutions gratuites soient actuellement disponibles (par exemple, Micmac, http://logiciels.ign.fr/?Micmac ou Visual SFM, http://ccwu.me/vsfm/ + algorithmes de reconstruction denses + Meshlab, http: //meshlab.sourceforge .net /, pour le maillage), PhotoScan, logiciel commercialisé par Agisoft, a été préféré en raison de sa gestion très conviviale de l'ensemble du processus de reconstitution 3D. L'acquisition des images est en général rapide face au temps de calcul au laboratoire. Par exemple la capture d'une scène simple, comme une stèle ornée, peut être réalisée en moins de 15 mn sur le terrain, mais sa reconstruction peut monopoliser un ordinateur pendant plusieurs heures selon la précision recherchée. Une configuration informatique puissante doit être envisagée, 32 Go de RAM (64 Go de préférence) et une carte graphique performante peuvent s'avérer indispensables. Dans les exemples présentés ici, concernant les stèles, la densité du nuage final est typiquement composée de plus de 30 millions de points, tandis que le modèle 3D contient plus de 4 millions de faces. Ce besoin d'une forte puissance de calcul ne devrait pas être un problème dans l'avenir car les capacités des ordinateurs augmentent sans cesse alors que le coût de l'équipement diminue. À côté de la documentation

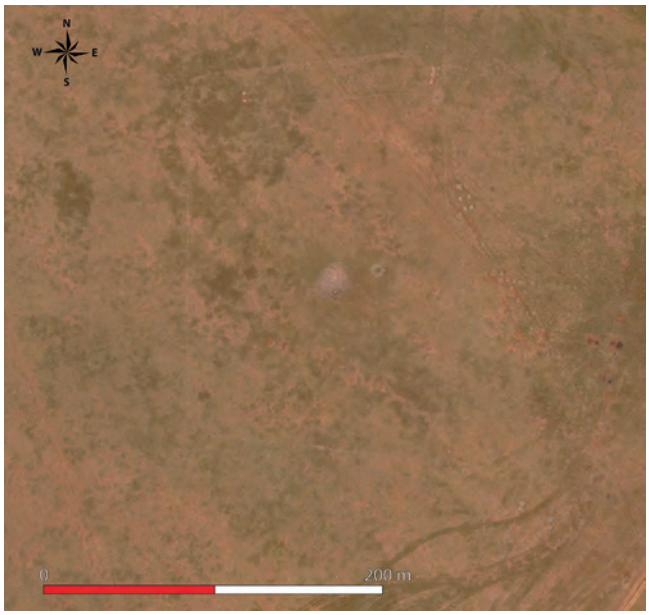


Fig. 43

Modélisation 3D à partir de 93 photos réalisées au drone à ca. 120 m au-dessus des structures du complexe funéraire B10, orthomosaïque (résolution : 4.3 cm/pixel). DAO F. Monna.

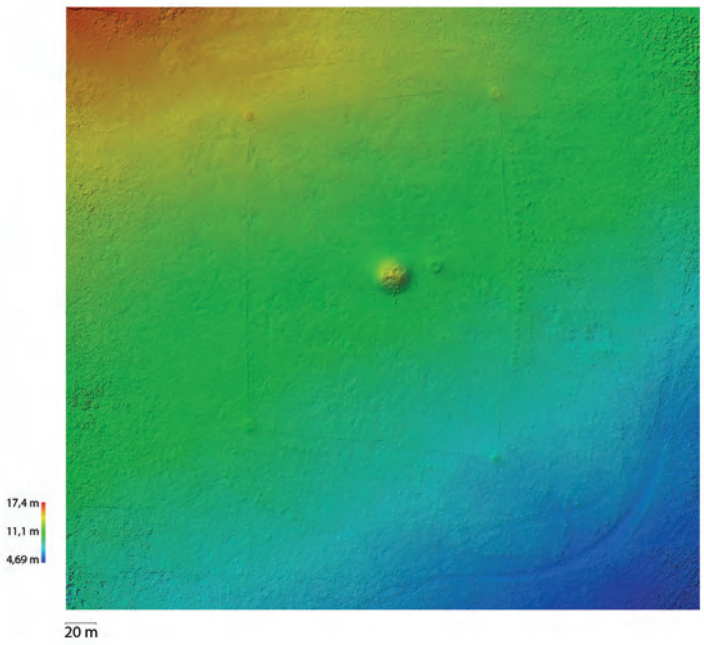
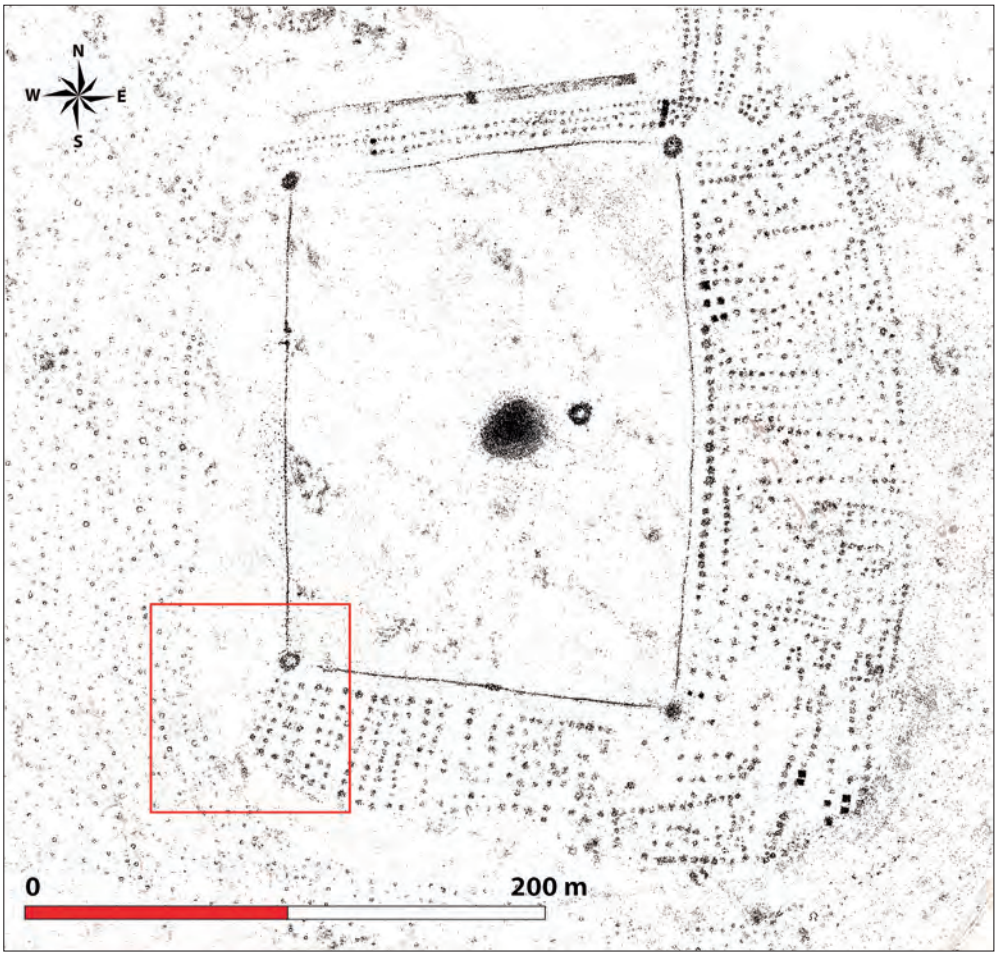
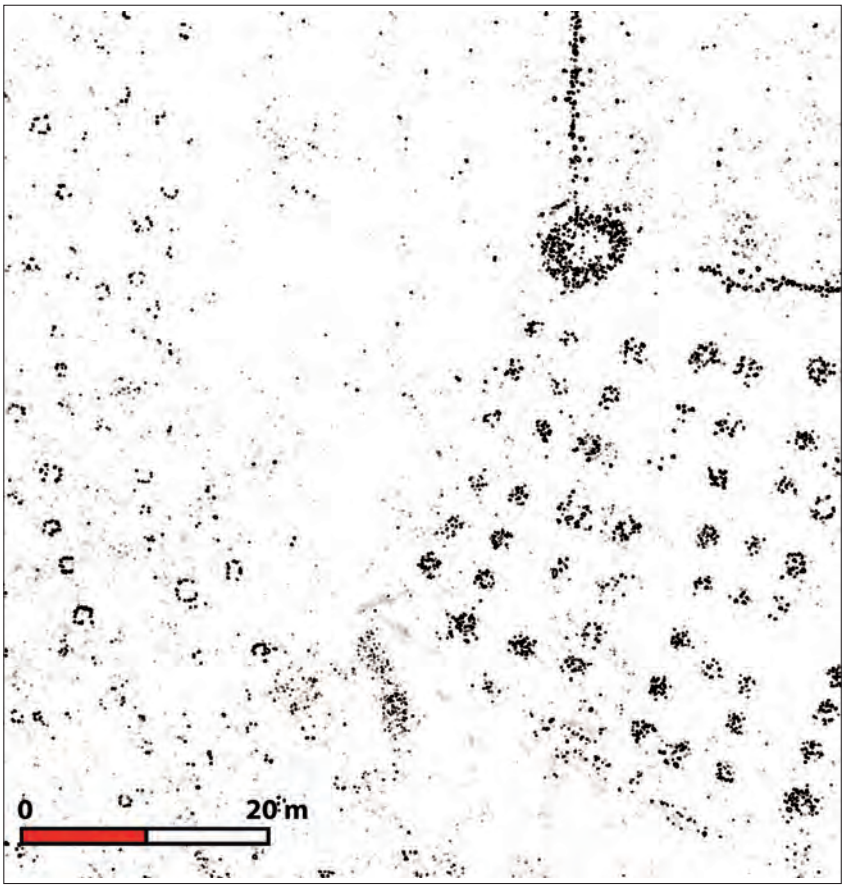


Fig. 44

Modèle numérique ombré (résolution : 4.3 cm/pixel), les différences d'élévation par rapport à un plan moyen sont représentées par une échelle de couleurs. DAO F. Monna.



a



b

Fig. 45 a et b

Délimitation des structures en combinant modèle numérique de terrain et orthomosaïque. (a) : en noir les pierres présentes avec certitude, en blanc les zones sans pierre avec certitude ; en marron, la présence de pierres avec une forte probabilité, mais aussi du bruit de fond ; (b) : zone détaillée où on distingue parfaitement les cercles de pierres à gauche et les tertres à droite. DAO F. Monna.

Fig. 46

Exemple d'utilisation du modèle tridimensionnel de la stèle n° 36 de la vallée du Haut Tamir (Tsatsyn Ereg) pour mieux lire les gravures et en établir un relevé. Ill. Y. Esin.

archéologique traditionnelle, les modèles 3D ont toute leur place (fig. 46). Ils peuvent être échangés entre chercheurs, partagés avec le public sur le web, imprimés ou être intégrés dans des scènes 3D (films, photos, ordinateur ou téléphone applications, jeux vidéo) avec l'éclairage artificiel souhaité. De la première photographie aux modèles tridimensionnels, les opérations sont exclusivement numériques et donc sauvegardées, notamment pour constituer des bases de données flexibles susceptibles d'être de nouveau utilisées, d'enrichir les cartes archéologiques et les inventaires patrimoniaux. Enfin, le progrès technique des imprimantes 3D rend envisageable la restitution réelle de certains objets ornés. Les artéfacts qui ne peuvent pas être copiés à l'aide de techniques de moulage pourront être imprimés soit à l'échelle 1:1 soit agrandis ou diminués, tout en respectant leurs proportions.

BIBLIOGRAPHIE

CHARLEUX I. (sous la dir.) (2016).– History, Architecture and Restoration of Zaya Gegeenii Khüree, Monastery in Mongolia. *Bulletin du Musée d'Anthropologie préhistorique de Monaco*, Monaco, Supplément 5, 192 p.

ESIN Y. N. (2010).– *Tajna bogov drevnej stepi*. Abakan: Khak NIIYaLI, 184 p.

FITZHUGH W. W., BAYARSAIKHAN J. (2008).– *Mongolia deer stone project: 2007 field report*, Washington/Ulaanbaatar, National Museum of Natural History - Smithsonian Institution — National Museum of Mongolian History.

GANTULGA J.-O., YERUUL-ERDENE C. & MAGAIL J. (2016).– *Deer stones of Khoid Tamir, Archaeological research in the valley of Khoid Tamir – I*. Admon Print, Ulaanbaatar.

Le Courrier de l'UNESCO (1998).– L'art des commencements, peintures et gravures rupestres. 50 p.

LEONTIEV N.V., KAPELKO V.F. & ESIN Y.N. (2006).– *Izvayania i steli okunevskoj kulturi*. Abakan: Khakasskoye knizhnoe izdatel' stvo, 236 p.

LUMLEY H. *et al.* (1995).– *Le grandiose et le sacré*. Edisud, Aix-en-Provence, 450 p.

MAGAIL J. (2008).– Tsatsiin Ereg, le site majeur du début du Ier millénaire en Mongolie. *Bulletin du Musée d'Anthropologie préhistorique de Monaco*, Monaco, 48, pp. 107-120.

MAGAIL J., GANTULGA J.-O., YERUUL-ERDENE C., TSENGEL M. (2010).– Inventaire et relevés des pierres à cerfs de Tsatsyn Ereg (Province de Arkhangaï, Mongolie). *Bulletin du Musée d'Anthropologie préhistorique de Monaco*, Monaco, 50, pp. 77-114.

MAGAIL J. (2015a).– La mission archéologique conjointe Monaco – Mongolie. Recherches scientifiques et leurs applications dans la valorisation du patrimoine. *Revue du CNRS en Chine, Dépasser les frontières*, 19, pp. 57-61.

MAGAIL J. (2015b).– Les stèles ornées de Mongolie dites « pierres à cerfs », de la fin de l'âge du Bronze. *Actes du 3e colloque international sur la statuaire mégalithique : « Pierres Levées du Néolithique à l'âge du Fer »*, Saint-Pons - Septembre 2012, pp. 89-101.

MONNA F., ESIN Y., MAGAIL J., GRANJON L., NAVARRO N., WILCZEK J., SALIGNY L., COUETTE S., CHATEAU C. (en préparation).– *Documenting carved stonesby 3D modelling and geospatial techniques – Case study of Mongolian deer stones.*

TAKAHAMA S., HAYASHI T., KAWAMATA M., MATSUBARA R., ERDENEBAATAR D. (2006).– *Preliminary Report of the Archaeological Investigations in Ulaan Uushig I (Uushigiin Övör) in Mongolia*, Kanazawa University.

TURBAT T., BAYARSAIKHAN J., BATSUKH D. & BAYARKHUU N. (2011).– *Pierres à cerfs de la Jargalantyn Am, Mongolie*. Patrimoine matériel ONG Association, Ulaanbaatar, 192 p.

UNESCO (2006).– *Textes Fondamentaux de la Convention du patrimoine mondial de 1972.*

VOLKOV V. (2002).– *Оленные камни Монголии*, Moscou, Научный мир.

WESTOBY M.J., BRASINGTON J., GLASSER N.F., HAMBREY M.J., REYNOLDS J.M. (2012).– 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, *Geomorphology*, 179, pp.300-314.