

LA PHOTOGRAMMETRIE RAPPROCHEE POUR LA MODELISATION EN 4D D'UNE STRUCTURE ARCHEOLOGIQUE

Mariam Samaan¹, Marc Pierrot Deseilligny¹, Raphaële Héno¹, Cyril Montoya^{2,3}, Sylvain Rassat³

1 : Université Paris-Est, ENSG, Laboratoire LGA, 6-8 avenue Blaise Pascal, 77455 Champs-sur-Marne France
(mariam.samaan, marc.pierrot-deseilligny, raphael.e.heno)@ensg.eu

2 : Aix Marseille Université, CNRS, Ministère de la Culture et de la Communication, LAMPEA UMR 7269, 13094, Aix-en-Provence, France
cyril.montoya@culture.gouv.fr

3 : DRAC Picardie, 5 rue Henri Daussy, 80 000 Amiens
sylvain.rassat@culture.gouv.fr

Résumé

Depuis plusieurs années, la photogrammétrie numérique est devenue un outil important dans le domaine de l'archéologie. Les spécialistes de ce domaine reconnaissent que cette technique permet d'enregistrer et de documenter les structures archéologiques ou à plus grande échelle l'intégralité d'un chantier de fouille, de manière rapide, fiable et précise. Pour les sites préhistoriques notamment, il est très important d'enregistrer et de maîtriser les différents niveaux de décapage de la fouille. Dans cet article, nous décrivons une méthodologie complète pour effectuer la numérisation photogrammétrique de structures archéologiques par un outil léger et à faible coût (une caméra).

La recherche expérimentale spécifique a eu lieu dans le cadre de la fouille programmée du site du Paléolithique supérieur de plein air "Le Colombier" à Chézy-sur-Marne (Aisne, France) dirigé par un des auteurs (C.M.). L'expérience s'est déroulée sur un foyer aménagé qui a été photographié à neuf étapes différentes du processus de décapage de la fouille. Des orthoimages à chaque étape ont été créées dans le but de produire un modèle 4D. En outre, des images numériques ont été acquises pour créer le modèle 3D complet.

Des logiciels open source (Apero / MicMac) ont été utilisés pour le géoréférencement et la corrélation dense. Ces procédures relativement standards conduisent à des cartes de profondeur, qui peuvent être représentées soit comme nuages de points 3D soit sous forme d'images en relief ombragé.

En premier lieu, nous abordons une brève description du site, les outils et méthodes mises en œuvre. Dans un second temps, nous faisons le point sur les résultats obtenus avant de conclure sur les perspectives.

Mots clés : Archéologie, fouille préhistorique, Chézy sur Marne, photogrammétrie rapprochée, modélisation, corrélation dense, nuage de points, MicMac.

Abstract

For several years, digital photogrammetry became a major tool in archaeology. Experts in this area recognize that this technique allows to record and document the archaeological or the whole excavation rapidly reliably and accurately. For prehistoric sites, it is very important for the archaeological research to accurately record and monitor all the different levels of an excavation. In this paper, we describe a complete methodology for performing photogrammetric digitizing of archaeological excavation using light and low cost tool (a camera).

The specific experimental research took place in an open air palaeolithic site excavation, "Le Colombier" in Chezy-sur-Marne (Aisne, France) led by one of the authors (C.M.). The experiment was conducted on a hearth that have been photographed at nine different stages during the excavation stripping process. Orthophotos for each layer were created in different stages in order to produce a 4D model.

Additionally, digital images were acquired to create the entire 3D model. Open source softwares (Aperitif / MicMac) were used for georeferencing and dense matching. These relatively standard procedures lead to depth maps, which can be represented either as 3D point clouds or as shaded relief images. First, we discuss a brief description of the site, the tools and method employed. Secondly, we review the results before concluding about future perspectives.

Keywords : Archaeology, prehistoric excavation, Chézy sur Marne, close-range photogrammetry, modeling, dense matching, point cloud, MicMac.

1. Introduction

La photogrammétrie est une technique qui permet de reconstituer une scène en trois dimensions à partir d'une série d'images prises selon un protocole adapté. Ce procédé est utilisé depuis plus de cinquante ans par l'IGN (aujourd'hui l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière) pour produire des cartes topographiques à partir de photographies aériennes. Cependant, les protocoles jusqu'alors mis en œuvre étaient extrêmement lourds, car le relevé en trois dimensions des informations topographiques devait être réalisé point par point par un opérateur. Aujourd'hui avec le développement important de la photographie numérique ainsi que de la puissance de calcul des ordinateurs, la production de données tridimensionnelles à partir de photographies peut être automatisée (Pierrot-Deseilligny and Clery, 2011).

En archéologie, l'accès à des données tridimensionnelles est un atout particulièrement important pour la mesure. À partir d'une modélisation en trois dimensions, il est possible d'extraire en plus grand nombre des données jusqu'alors collectées à partir de relevés archéologiques en plan. En outre, la modélisation 3D peut être utilisée dans un but de valorisation et permettre de présenter au public des lieux difficiles d'accès, devenue inaccessibles, voire protégés (ex. grottes ornées).

Compte tenu de sa simplicité, la méthode de relevé présentée dans cet article peut être mise en œuvre systématiquement puisqu'elle ne nécessite que l'utilisation d'un appareil photographique numérique, et éventuellement d'une perche.

Notre travail avec la DRAC Picardie (Direction Régionale des Affaires Culturelles) sur le site préhistorique "Le Colombier" a pour but de réaliser un travail de transfert et d'accompagnement des outils photogrammétriques vers le domaine de l'archéologie (préventive et/ou programmée) c'est-à-dire de tester la possibilité d'appliquer les méthodes photogrammétriques en archéologie en faisant des protocoles légers et fiables d'acquisition pour une mise en œuvre simple sur le terrain par les archéologues.

1.1. Le site préhistorique "Le Colombier"

Le site paléolithique de plein air est situé sur la commune de Chézy sur Marne (Aisne) à environ 7 km au sud-ouest de Château-Thierry. Il est positionné au sommet d'un versant sur un léger replat d'un promontoire qui domine la vallée de la Marne et plus particulièrement la confluence de cette dernière avec un de ses affluents le Dolloir. Découvert en 2010 à la suite d'une opération d'archéologie préventive, il fait l'objet depuis 2011 de campagnes de fouille annuelle programmée. Les premières investigations archéologiques ont montré un site au potentiel scientifique inédit pour la moitié nord de la France et relativement bien conservé compte tenu de son âge et des différentes catégories de vestiges qui nous sont parvenues : restes de faune (renne

et cheval), parures en coquillages, et industrie lithique en silex. Plusieurs datations au carbone 14 permettent de caler le(s) occupation(s) humaine(s) au cours du Dernier Maximum Glaciaire entre 17 500 et 19 000 ans (Montoya et al., 2011 ; 2012). Le site a livré également de manière exceptionnelle deux structures de combustion. Ce type de structure, rarement bien conservé dans des sites de plein air, a polarisé au cours du Paléolithique des structures d'habitat et/ou de nombreuses activités. En cela, l'étude de leurs abords et de leur fonctionnement sont des informations précieuses pour tenter de restituer le mode de vie des groupes humains paléolithiques. Découvert en 2011, le foyer KL 20-21 est composé de plusieurs dalles et blocs de grès appariés (Figure 1). La superposition des blocs de grès chauffé et la densité importante des vestiges au sein de cette structure a nécessité une fouille minutieuse sur trois campagnes. La dernière (2013) a été mise à profit pour mettre en place un protocole de relevé photogrammétrique des différents décapages de la structure.

Les premières analyses plaident pour l'existence d'un double noyau (A et B) de combustion sur la base de la différence de calibre, de morphologie des blocs, et de leur agencement (Figure 2). Toutefois la chronologie de l'aménagement de ces deux noyaux est encore en cours d'étude.

1.2. Objectifs

L'objectif initial du travail est de vérifier la possibilité de mettre en œuvre un protocole adapté de relevé photogrammétrique pour la modélisation 3D de l'état initial du foyer. Le second point qui doit être vérifié concerne la modélisation de la structure archéologique en 4D, c'est-à-dire l'intégration du temps dans la modélisation 3D des différentes couches de décapage et de démontage des pierres. Ceci doit permettre de superposer tous les modèles 3D ensemble, qui serviront de support d'analyse aux préhistoriens.

L'objectif est double. Il s'agit d'une part de restituer en 3D la chronologie de remplissage en vestiges de la structure et en cela d'appréhender précisément la dynamique de fonctionnement et la fonction de celle-ci. Cette modélisation apparaît d'autre part comme une excellente archive scientifique pour l'étude en post-fouille de la structure.

Pour cela nous avons divisé le processus photogrammétrique en deux étapes : la modélisation d'un nuage de points 3D complet de l'amas (voir Figure 3) et la modélisation 4D (c'est-à-dire le modèle intégrant toutes les phases de démontage des pierres).

2. Prise de vues sur le terrain

2.1. Matériel et logistique

La caméra utilisée pour obtenir les images de l'amas est une caméra grand public (Canon EOS 60D). Cette caméra présente une série d'avantages : son faible encombrement et sa résistance sont particulièrement



FIGURE 1 : Foyer KL20-21 en cours de fouille (état en 2011).

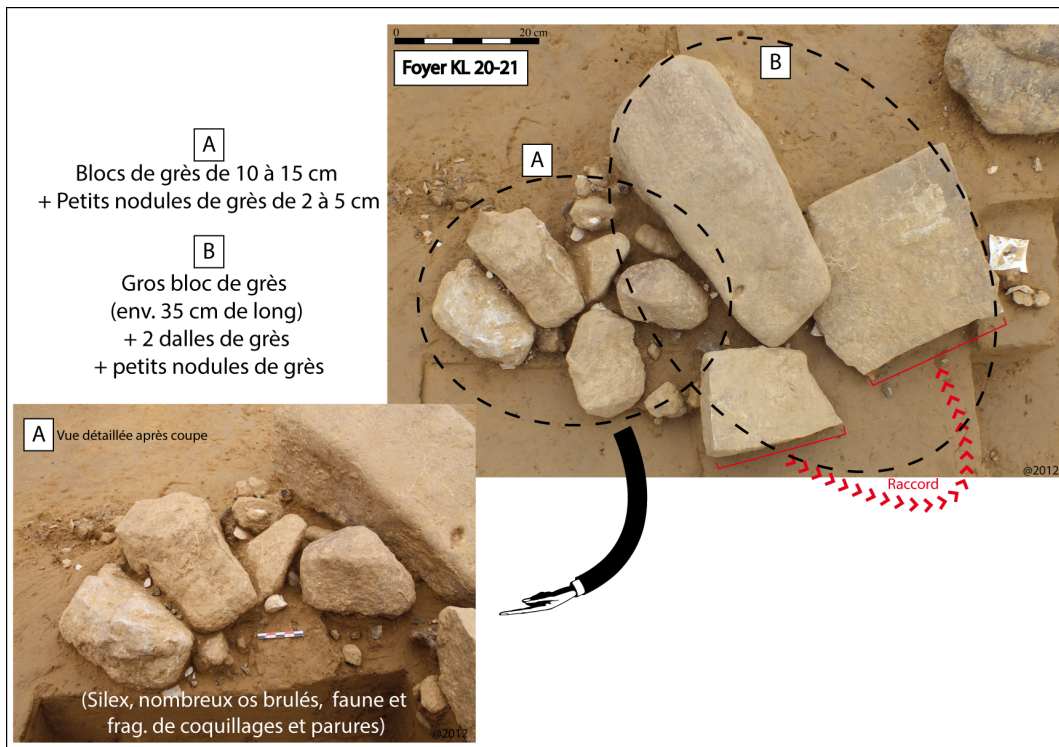


FIGURE 2 : Hypothèses de structuration du foyer KL 20-21 (photos 2012).



FIGURE 3 : Foyer KL20-21 (début campagne 2013) - "Le Colombier" à Chézy sur Marne.

favorables au travail de terrain. Par ailleurs elle présente une résolution maximale de 5184×3456 pixels.

En ce qui concerne l'objectif, l'utilisation d'un grand angle fixé à 17 mm a été privilégiée, car il permet de limiter de nombre de photos à prendre pour couvrir la totalité d'une scène.

Des spécifications de prise de vues rapide ont été données à l'archéologue de façon à ne pas trop alourdir sa charge de travail. Ensuite, les images ont été transférées via internet pour les traitements au laboratoire. Afin de géoréférencer les relevés du foyer dans le même système de coordonnées que la fouille, des cibles ont été placés sur l'ensemble de la structure à photographier dans le cadre du stage d'un étudiant de l'ENSG (École Nationale des Sciences Géographiques). Ces points d'appui sont indispensables pour pouvoir mettre toutes les acquisitions du foyer (l'acquisition de l'état initial de la structure avec celles des différents décapages) dans un même référentiel afin de pouvoir superposer tous les modèles 3D (modèle 4D).

Les cibles ont été levées à l'aide d'une station totale laser Trimble S3, comme l'ensemble des points des différentes catégories de vestiges côtés sur le site. Il faut souligner que la détermination des cibles dans un système de coordonnées local par des méthodes topométriques a été réalisée pour ce chantier dans un souci de contrôle des données produites, et parce qu'un opérateur était disponible pour les mesures et les calculs. Mais on peut tout à fait imaginer de simplifier le mode opératoire et de n'utiliser les cibles comme points d'amer entre les différents démontages qu'en relatif.

Les points topométriques (PT n°1 à 10) ont été mesurés une seule fois, au début de la campagne de fouille archéologique 2013 (Figure 4).

La modélisation du foyer est un travail en continu tout au long de la fouille et contient plusieurs étapes (voir Figure 5).

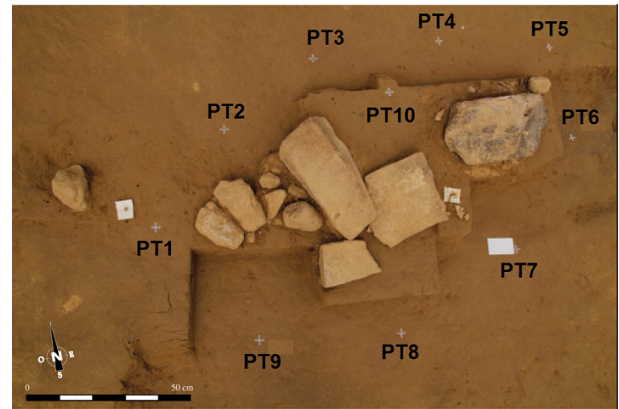


FIGURE 4 : Points d'appui du chantier.

2.2. Protocole d'acquisition avant démontage des pierres

Afin de minimiser les risques d'oubli de zones photographiées, il était important de définir un protocole de prise de vues avant l'enregistrement de la structure. Dans un premier temps, une première acquisition d'images a été réalisée où l'archéologue a pris quelques images convergentes (environ 11 images) autour du foyer ainsi que 4 images à axe de prise de vues vertical. Cette configuration doit permettre d'éviter les parties cachées et d'obtenir un modèle 3D le plus complet possible de l'état initial du foyer. On peut noter que cette prise de vues n'était pas favorable. Il faut en effet une certaine pratique pour réussir une prise de vues optimale pour des traitements photogrammétriques. Le premier essai de prise de vues a produit des images en nombre insuffisant et présentant des écarts d'orientation importants (angle d'inclinaison entre les différents axes de prise de vues supérieur à 15 degrés), ce qui empêche, pour des raisons liées à la chaîne logicielle utilisée pour les calculs photogrammétriques, de traiter toutes ces images en même temps (Pierrot-Deseilligny and Cléry, 2012). C'est pourquoi une autre acquisition a été effectuée en tenant compte des points suivants :

Augmentation des recouvrements entre images.

En effet pour que le logiciel puisse reconnaître suffisamment de points communs entre les photos pour reconstruire la structure archéologique, on augmente le recouvrement entre les images (très supérieur à 60%). D'ailleurs, la multiplication des vues différentes facilite le traitement logiciel et augmente la précision du modèle (Pierrot-Deseilligny and Paparoditis, 2006).

Amélioration du dispositif matériel de prise de vues.

Afin de bien fixer la caméra pendant l'acquisition et pour obtenir des images plus nettes, nous avons utilisé un dispositif de maintien de l'appareil photo : il s'agit d'une perche de type Manfrotto 420B.

Insertion dans la scène d'une mire de couleurs

Pour pouvoir étalonner les couleurs dans le but d'homogénéiser les rendus pour toutes les acquisitions.

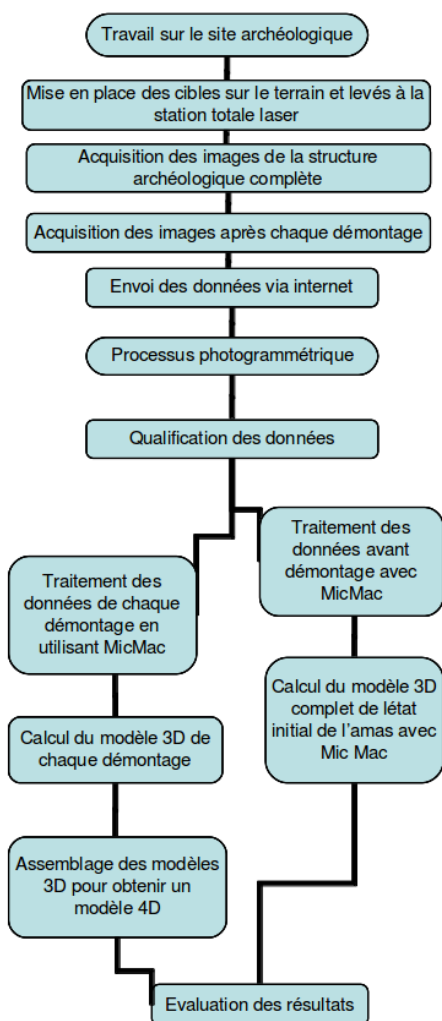


FIGURE 5 : Flux de travail.

2.3. Acquisition pendant le démontage des pierres

Il faut ensuite enregistrer la structure à chaque démontage. Afin de modéliser en 4D, il est nécessaire de prendre une série d'images à axe de prise de vues vertical couvrant l'ensemble de l'amas pour chaque décapage, car ils peuvent représenter différentes chronologies et différentes utilisations de la structure archéologique fouillée. Des images à axe de prise de vues vertical plutôt qu'oblique ont été préférées pour deux raisons. Tout d'abord, puisque la fouille doit s'arrêter pour permettre l'enregistrement photogrammétrique de chaque décapage archéologique, il est important que l'acquisition soit la plus rapide possible. Par ailleurs, l'objet d'intérêt étant la couche archéologique, qui est habituellement une surface proche de l'horizontal

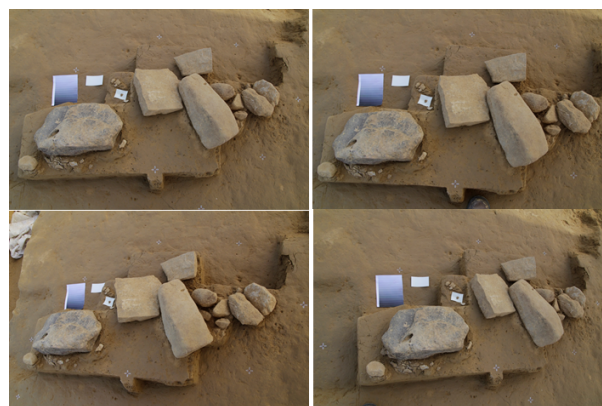


FIGURE 6 : Images à axe de prise de vues vertical de l'amas.

(Georgiadis et al., 2000), on peut se contenter des images verticales.

Les images acquises lors de l'expérimentation ne sont pas parfaites pour tous les décapages : on constate que la base stéréoscopique est parfois trop importante entre deux paires d'images. De plus, l'angle d'intersection des rayons perspectifs a atteint 25 degrés, conduisant à des problèmes sur les résultats (trous, bruit, etc.).

De plus, nous avons des images au format JPG parmi les données, ce qui n'est pas idéal en qualité pour le traitement photogrammétrique (Egels and Kasser, 2002).

Dans la figure 8, un exemple d'images à axe de prise de vues vertical présente l'avancement de la fouille au bout de plusieurs jours de démontage. Ces deux phases d'acquisition de données (avant et pendant le démontage) ont été réalisées par l'archéologue sur place. Les étapes suivantes du flux de travail ont été élaborées au laboratoire et ont été centrées sur le traitement des données et la production des modèles finaux.

3. La chaîne photogrammétrique

Il existe aujourd'hui de nombreux logiciels de modélisation 3D à partir d'images. Parmi ces solutions on peut citer les logiciels gratuits :

- PMVS (Furukawa and Ponce, 2010) : logiciel libre, gratuit et multiplateforme qui génère des modèles 3D à partir d'images géoréférencées (la mise en place des images peut être calculée par le logiciel libre et gratuit Bundler).
- Arc3D (Vergauwen and Van Gool, 2006) : calcule des modèles 3D à partir d'images envoyées sur un serveur distant plutôt orienté "grand public".
- 123DCatch : solution gratuite proposée par Autodesk (là encore, les images sont envoyées sur un serveur, où est calculé un nuage de points 3D que reçoit l'utilisateur).
- MicMac, décrit ci-après.

Il existe également des logiciels payants ayant fait leur preuve : Agisoft Photoscan, Smart3D Capture, Photomodeler Scanner, Insight 3D ...

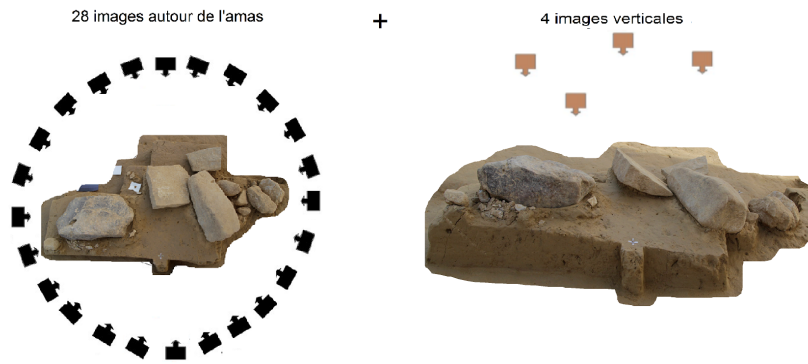


FIGURE 7 : Schéma de protocole d'acquisition final de l'amas avant le démontage des pierres.



FIGURE 8 : Série d'images autour de l'amas.

1ère démontage



2ème démontage



3ème démontage



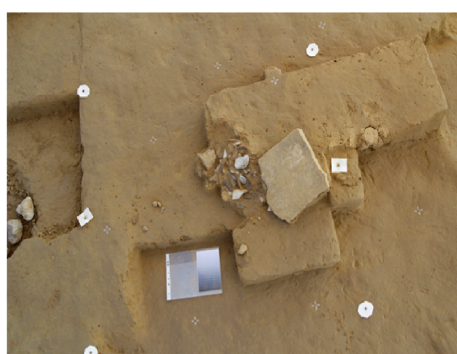
4ème démontage



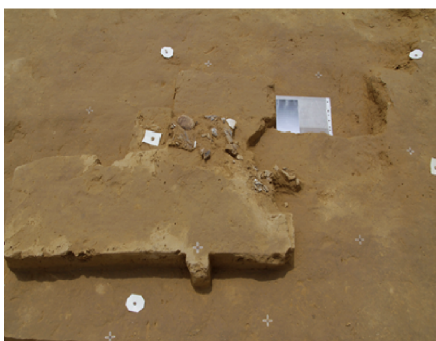
5ème démontage



6ème démontage



7ème démontage



8ème démontage



FIGURE 9 : Avancement de la fouille de l'amas.

Plusieurs paramètres peuvent guider le choix du logiciel, comme les habitudes de l'utilisateur, le besoin d'ergonomie, le prix, ou le besoin de contrôle à toutes les étapes du processus. C'est surtout ce dernier critère qui nous a amené à choisir la suite logicielle Apero/MicMac, décrite ci-après.

3.1. Apero/MicMac

L'IGN a mis au point une "suite" logicielle libre et open source photogrammétrique pour construire des modèles 3D à partir d'images. Une documentation détaillée de ces outils peut être téléchargée sur (Pierrot-Deseilligny, 2013). Comme plusieurs autres solutions, la suite logicielle de l'IGN pour le calcul de modèles 3D est composée de trois modules principaux :

- **Pastis** (acronyme de "Programme utilisant Autopano SIFT pour le Tie-points dans les Images"). Le logiciel calcule les points de liaison à partir d'images non-orientées. Il utilise des algorithmes mettant l'accent sur les descriptions invariants de points saillants.
- **Apero** (acronyme de "Aérotriangulation Photogrammétrique Expérimental Relativement Opérationnel") Le logiciel prend en entrée des observations (mesures de points de liaison et éventuellement de points appui) et produit un étalonnage de la caméra et le calcul des positions et orientations des caméras au moment de la prise de vues.
- **MicMac** (acronyme de "Multi Image Correspondance, Méthodes Automatique de Corrélation") (Pierrot-Deseilligny and Clery, 2010) Ce logiciel est un logiciel de traitement d'images, qui calcule l'appariement dense à partir d'images orientées avec précision par le module Apero.

Ces modules sont utilisables en ligne de commande et nécessitent d'utiliser des fichiers de paramètres au format `xml`. La plupart des traitements décrits dans cet article ont été réalisés via des commandes simplifiées disponibles depuis 2012 ("Tapioca" pour le calcul des points de liaison, "Tapas" pour la mise en place des images, et "Malt" pour les calculs d'appariement et d'orthorectification d'images).

3.2. Traitement des nuages de points 3D

Après avoir présenté les données du chantier de l'amas, nous allons présenter dans cette partie les traitements que nous avons effectués au laboratoire. La première étape dans le processus de traitement est le calcul des points homologues entre les images en utilisant Tapioca où nous avons dû spécifier le paramètre "MulScale" qui permet une stratégie multi-échelles pour limiter le temps de calcul. Dans une étape préliminaire, toutes les paires sont examinées à une très basse résolution. Seules les paires contenant des points de liaison à faible résolution sont sélectionnées pour le calcul à haute résolution.

Deuxièmement, le processus d'orientation avec Tapas a commencé en faisant de l'auto calibration de la caméra en prenant de nombreuses images sur la même scène de l'amas, et en reliant les points d'appui mesurés sur l'amas pour faire l'orientation absolue finale. Nous avons analysé la précision de positionnement absolu finale obtenue dans le procédé photogrammétrique en utilisant les 10 points d'appui bien répartis. Le Tableau 1 montre les valeurs de résidu pour les points d'appui.

Après l'extraction des points de liaison et l'estimation de poses des caméras, une carte de profondeur est extraite à partir des images en utilisant MicMac, dont on peut dériver un nuage de points 3D dense. L'approche utilisée ici est la géométrie image. Cette approche consiste à appairer les pixels de la zone d'intérêt (restreinte par un masque) d'une image maîtresse avec les pixels des images voisines en contraignant la recherche par la géométrie épipolaire couple par couple. Cette stratégie permet de trouver la meilleure profondeur possible pour les pixels de l'image.

4. Résultats et analyse

4.1. Résultats du nuage de points 3D complet de l'amas

A l'issue du processus de production photogrammétrique, une carte de profondeur (convertissable en nuage de points 3D) de l'état initial des pierres a été obtenue (Figures 9 et 10).

A l'aide de cette image de relief estompé nous pouvons qualifier notre résultat car elle permet d'apprécier qualitativement le bruit, et les artefacts éventuels. En plus grâce aux Figures 10 et 11 nous constatons la correspondance entre l'amas réel et l'amas calculé à partir de notre méthode photogrammétrique.

En conclusion, notre protocole photogrammétrique peut à présent être proposé comme un outil fiable, léger et applicable par l'archéologue lui-même pour l'étude des amas archéologiques et notamment la modélisation en 3D.

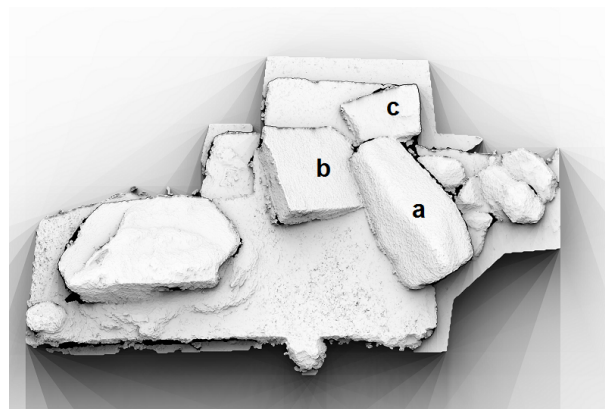


FIGURE 10 : Image ombrée de modèle 3D.

Données	Résidu moyen en mm	Nombre de points mesurés
Avant Démontage(17/06/2013)	0,316	10
1er Démontage (19/06/2013)	0,324	10
2ème Démontage (21/06/2013)	0,398	10
3ème Démontage (24/06/2013)	0,453	7
4ème Démontage (25/06/2013)	0,362	10
5ème Démontage (25/06/2013)	0,332	8
6ème Démontage (26/06/2013)	0,320	10
7ème Démontage (27/06/2013)	0,315	9
8ème Démontage (27/06/2013)	0,311	10

TABLE 1 : Valeurs des résidus moyens sur les points d'appui (Orientation absolue).

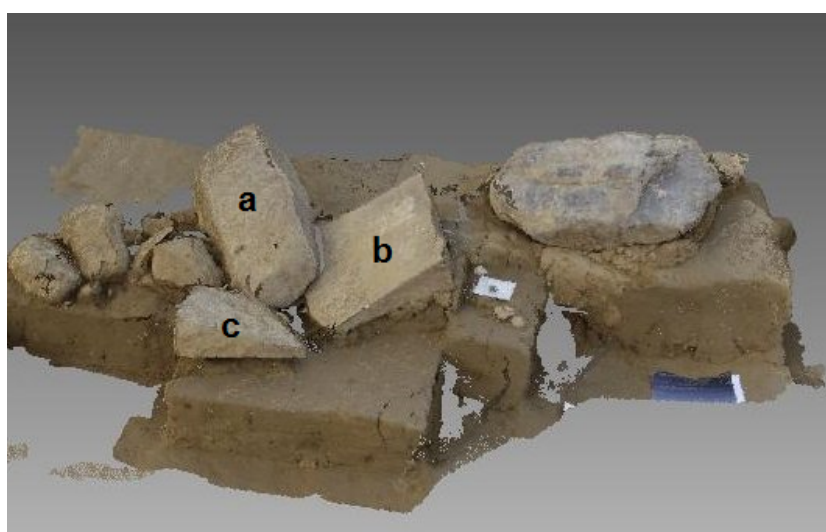


FIGURE 11 : Nuage de points 3D complet produit.

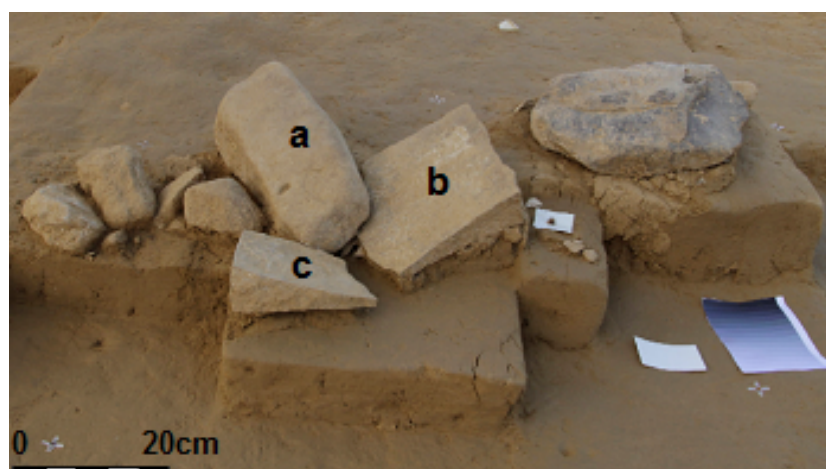


FIGURE 12 : Le foyer "expérimental" réel en cours de fouille.

4.2. Résultats des démontages

A la suite de notre traitement photogrammétrique, neuf modèles 3D pour chacune des neuf décapages ont été calculés. Enfin tous les modèles enregistrés ont été superposés pour créer un modèle 4D.

Le Figure 13 permet d'observer les différents décapages du foyer et les différents démontages des blocs fouillés : on observe d'après ces différentes ortho-images que le décapage a été initié à droite, avec une petite concentration sous un bloc, puis s'est orienté à gauche sous l'amas de gros blocs.

4.3. Analyse et exploitation des résultats

Certains résultats sont décevants, notamment en raison de la qualité des images en entrée du processus. On observe en particulier un phénomène de mitage et une hétérogénéité radiométrique dans le nuage de points 3D.

Trous : Sur quelques résultats de démontage des pierres nous avons observé des trous (Figure 14). Le pourcentage de ces trous est variable entre 5 et 30% du modèle final. Cela est vraisemblablement dû aux raisons suivantes.

Angle d'inclinaison et forte base stéréoscopique : nous avons observé de fortes valeurs d'angle d'inclinaison (jusqu'à 25 degrés) entre images voisines, ainsi qu'une forte base stéréoscopique. Hors, MicMac, la chaîne logicielle utilisée, préconise d'avoir des images proches (Samaan et al., 2013).

Parties cachées : certaines zones de l'amas vues sur une ou deux images seulement ne peuvent pas donner lieu à une reconstruction complète.

Après l'obtention de ces résultats sur les démontages, il faut vérifier que notre application photogrammétrique convient aux besoins des archéologues. Pour ce traitement nous avons réalisé une superposition de deux ortho-images des démontages pour deux jours différents pour vérifier la cohérence entre les résultats obtenus. Les résultats de la superposition sont présentés dans la figure 15. Ici, nous avons traité l'ortho-image du premier démontage avec celle du dernier démontage.

On peut constater globalement que les deux nuages sont quasi superposables entre eux à une précision de 2mm. C'est une valeur un peu élevée et cela est dû probablement à la forme des cibles qui sont grandes, ce qui a empêché de correctement les pointer au centre. D'autres tests seront menés pour affiner le calage relatif des différents démontages. Toutefois, cette variation de précision de 2 mm est largement acceptable en archéologie en particulier pour l'exigence de relevé nécessaire à ce type de structure.

5. Conclusion et perspectives

Dans cet article, nous avons proposé des protocoles d'acquisition pour la modélisation en 3D de l'a-

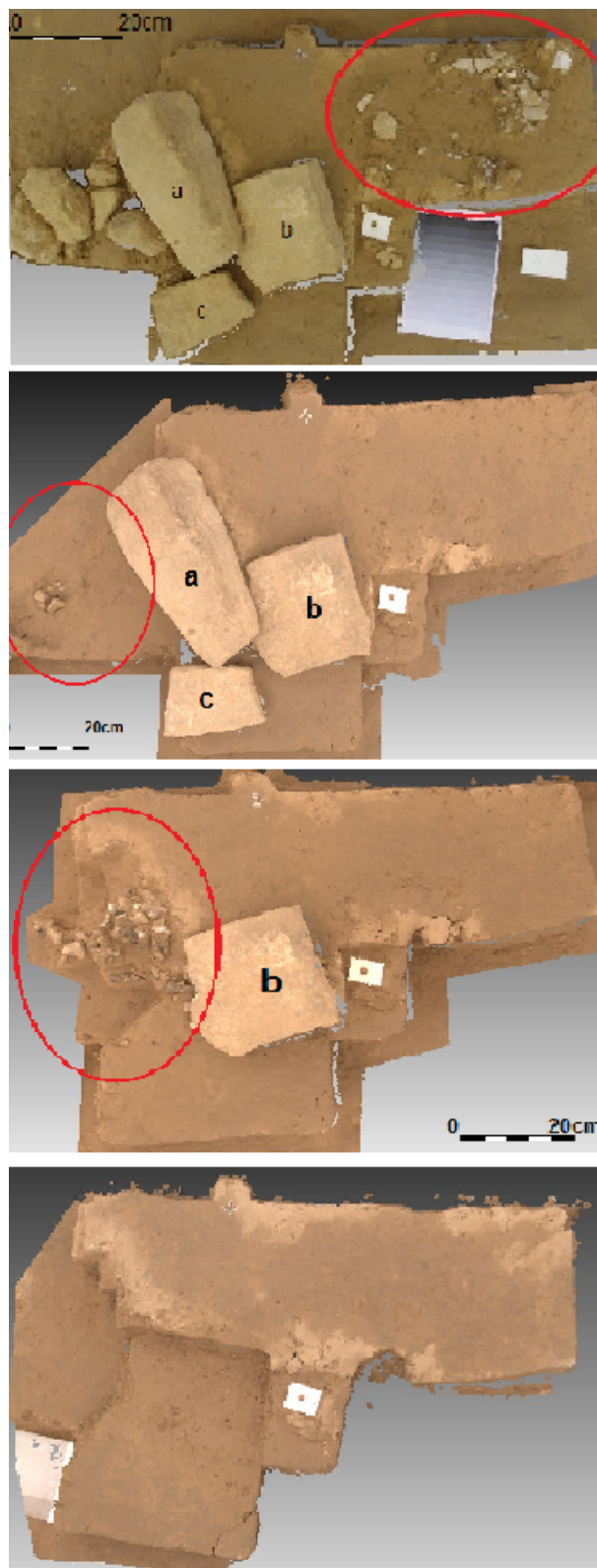


FIGURE 13 : Des orthoimages superposables des différentes couches de l'amas. Haut : en rouge, décapage de partie droite de l'amas. Milieu haut : en rouge, démontage du noyau A du foyer. Milieu bas : en rouge, démontage en cours du noyau B. Bas : L'amas après le démontage final.

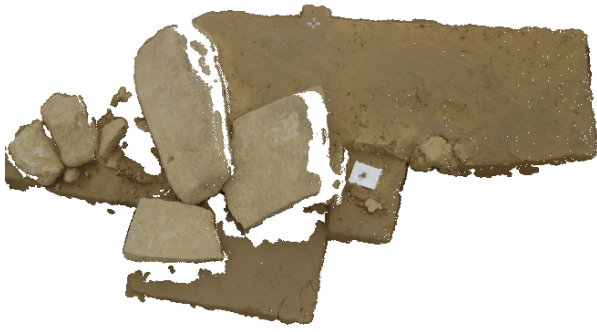


FIGURE 14 : Trous du nuage de points 3D.

mas archéologique. Ainsi, la modélisation en 4D est produite en assemblant les modèles 3D de chaque couche. L'ensemble de ces protocoles a été organisé de manière à ce que les archéologues puissent acquérir eux-mêmes les images. La présence d'un expert photogrammètre n'étant pas obligatoire, toutes les données seront transférées via Internet pour le traitement photogrammétrique. Pour un archéologue, les résultats obtenus offrent de nouvelles possibilités d'enregistrements et d'analyses. Ces dernières permettent d'aborder au-delà d'un simple modèle en 2D la chronologie et la dynamique de fonctionnement de la structure archéologique. Toutefois, l'exploitation de ces modélisations 4D se trouvent encore confronter à l'absence de suites logicielles autorisant la gestion et un rendu graphique de ces données de manière accessible au plus grand nombre. Il est probable que les outils d'analyse des SIG, bien répandu en archéologie, faciliteront l'exploitation de ces données par les archéologues en permettant de réaliser des analyses spatio-temporelles complexes. Ainsi, un SIG 4D apporterait des possibilités de gestion de quantités importantes d'informations archéologiques non envisageable encore aujourd'hui. Cet outil, jumelé aux technologies d'intelligence artificielle (Gumerman et al., 2000) et avec les logiciels open source actuels (GRASS GIS, POSTSIG,...) (Bezzi et al., 2006) permettront peut-être à terme de faire revivre le passé, à la manière d'une machine à remonter le temps, à la recherche de comportements anciens à hautes valeurs culturelles (Barcelo, 1999 ; 2000).

Références

Barcelo J.A., Briz I., Villa A., 1998. New Techniques for Old Times, CAA98. Computer Applications on Quantitative Methods in Archaeology. In : Proc. of the 26th Conference, Barcelona, March 1998. BAR International Series 757, Oxford, Archaeopress, 1999.

Barcelo J.A., Forte M., Sanders D.H., 2000. Virtual Reality in Archaeology. BAR International Series 843, Oxford, Archaeopress.

Bezzi A., Bezzi L., Francisci D., Gietl R., 2006. The Application of Voxel in Archaeology. Settimo Meeting Degliutenti Italiani di GRASS, Genova, Italy.

Egels Y., Kasser, M., 2002. Digital Photogrammetry. Taylor and Francis, London, United Kingdom.

Georgiadis C., Tsioukas V., Sechidis L., Stylianidis E., Patias P., 2000. Fast And Accurate Documentation Of Archaeological Sites Using In The Field Photogrammetric Techniques. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Vol. XXXIII, Part B5, Amsterdam, The Netherlands.

Furukawa Y., Ponce J., 2010. Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 32(8) : 1362–1376.

Gumerman G.J., Dean J.S., 2000. Artificial Anasazi : Digital People Farm a Computerized Landscape in Prehistoric Arizona. Discovering Archaeology, vol. 2, no. 2, pp.44-51.

Montoya C., Bignon O., Peschoux C., Rassat S., 2011. Fouille programmée de Chézy-sur-Marne (Aisne). Rapport de fouille programmée, Service Régional de l'Archéologie de Picardie, Amiens, France, 65p.

Montoya C., Averbouh A., Bignon O., Dumarcay G., Goutas N., Peschoux C., Rassat S., 2012. Fouille programmée de Chézy-sur-Marne (Aisne). Rapport de fouille programmée, Service Régional de l'Archéologie de Picardie, Amiens, France, 83p.

Pierrot Deseilligny M., Clery I., 2011. Évolutions récentes en photogrammétrie et modélisation 3D par photo des milieux naturels. In Jaillet S., Ployon E., Villemin T. (Eds.), Images et Modèles 3D en Milieux naturels, Le Bourget-du-Lac, France, Edytem, t. 12, p.51-66.

Pierrot Deseilligny M., Clery I., 2012. Some possible protocols of acquisition for optimal use of the Apero open source software in automatic orientation and calibration. Tutorial for EuroCow workshop, Castelldefels, Spain, 8-10 February 2012.

Pierrot Deseilligny M., Pappadimitris N., 2006. A multi-resolution and optimization-based image matching approach : An application to surface reconstruction from SPOT5-HRS stereoimagery. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXVI-1/W41 (on CD-ROM).

Pierrot Deseilligny M., 2013. MicMac, Apero, Pastis and other beverage. The doc! <http://www.micmac.ign.fr/svn/micmac/trunk/Documentation/DocMicMac/DocMicMac.pdf> (Accessed 20 December 2013).

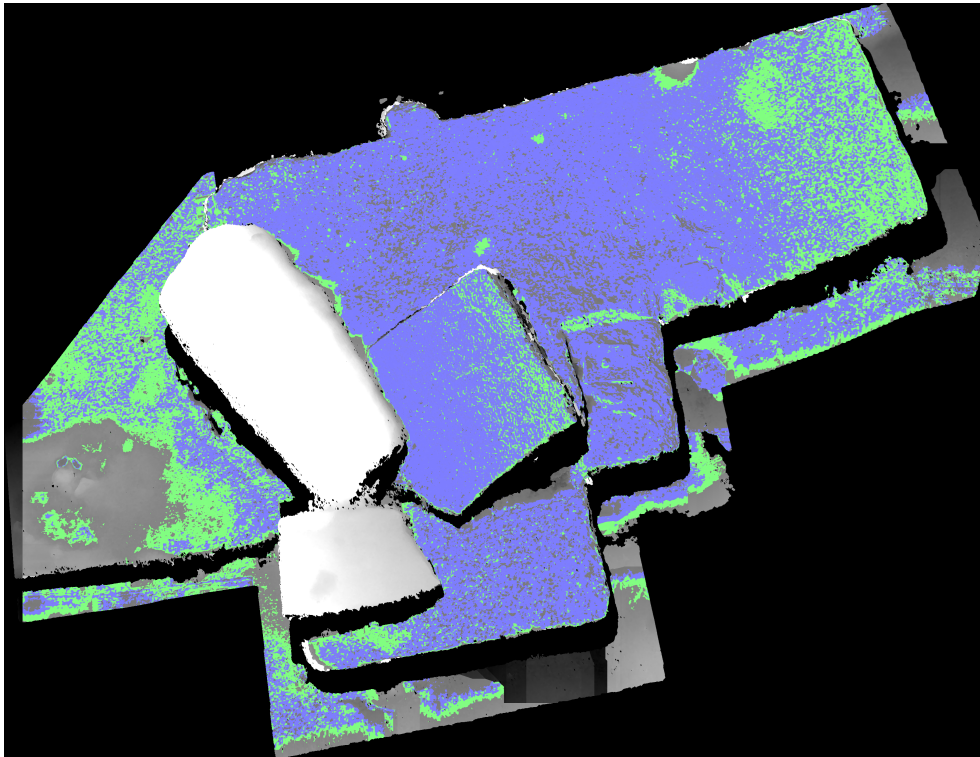


FIGURE 15 : Superposition de deux orthoimages du 1ère et dernier démontage.

Pierrot Deseilligny M., Cléry I., 2010. Interface ergonomique de calculs de modèles 3D par Photogrammétrie. In : Colloque Photogrammétrie au Service des Archéologues et des Architectes, SFPT-CIPA, Villeneuve-lez-Avignon, France, September 2010.

Samaan M., Héno R., Pierrot Deseilligny M., 2013. Close-range photogrammetric tools for small 3D archeological objects. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XL-5/W2, pp.549-553.

Vergauwen M., Van Gool L., 2006. Web-Based 3D reconstruction service. Machine Vision Applications 17 :411-426.