



**HAL**  
open science

## 3D acquisition by photogrammetry in archeology

Mehdi Belarbi, Pascal Raymond, Nicolas Saulière, Régis Touquet

► **To cite this version:**

Mehdi Belarbi, Pascal Raymond, Nicolas Saulière, Régis Touquet. 3D acquisition by photogrammetry in archeology. Archéopages : archéologie & société, 2012. hal-02302187

**HAL Id: hal-02302187**

**<https://hal.science/hal-02302187v1>**

Submitted on 1 Oct 2019

**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.

### L’acquisition 3D par photogrammétrie en archéologie

Medhi Belarbi, Pascal Raymond, Nicolas Saulière, Régis Touquet, Inrap

Le relevé 3D d’une sépulture à l’Inrap, à l’aide d’un scanner laser et d’un logiciel de traitement de données

Le relevé archéologique

Le relevé a pour fonction la figuration d’une réalité conditionnée par la perception qu’en a son auteur et par sa maîtrise des techniques de transcription. La mise à plat d’un relief suppose des connaissances en géométrie et un matériel de mesure adapté pour limiter les erreurs de proportions. Les illustrations ainsi produites sont pertinentes si elles sont géométriquement fiables. Pour que la restitution soit fidèle au vestige, une part de la subjectivité doit donc être compensée par des moyens de mesure adaptés. Ils assurent ainsi l’objectivité par la prise de références ou de valeurs témoins contrôlables. L’acquisition 3D est un moyen d’enregistrement de formes irrégulières ou complexes. Le relevé en 3D de certains types de sites (très stratifiés, structures au relief accidenté, architecture monumentale ou vernaculaire) préserve leur géométrie. Ces relevés contribuent à la documentation scientifique sous la forme de vue fixe. En effet, les modes de diffusion de l’information s’inscrivent principalement dans un schéma classique qui nous conduit à envisager les illustrations finales en 2D. La modélisation facilite considérablement ce travail de restitution des observations. Elle autorise les vues cavalières, les axonométries et surtout les vues géométrales qui correspondent à nos codes de représentation.

La topographie permet d’effectuer ces opérations en enregistrant une information succincte selon des formes géométriques simplifiées. Dans certains cas, elle sert de cadre pour repositionner des photos redressées afin de fournir des vues ortho-rectifiées. Toutefois, cette solution n’est pas idéale dans les situations où les reliefs sont trop prononcés et les modénatures trop riches. Pour ces catégories de vestiges, l’acquisition 3D, avec des nuages de points à haute densité, permet de révéler les volumes avec exactitude. Des outils comme les scanners 3D offrent cette possibilité. Cependant, leurs prix et les contraintes de leurs mises en place rendent leur utilisation rare et ce matériel ne concerne, de ce fait, que des vestiges exceptionnels. La nécessité de justesse dans les relevés ne pouvant se limiter qu’aux seuls éléments remarquables, nous avons maintenu une veille technologique qui a conduit au test de plusieurs solutions. Parmi les outils de mesure se sont développées des solutions logicielles permettant l’acquisition en 3D par photogrammétrie : les logiciels libres Bundler<sup>1</sup>, PMVS, CMVS<sup>2</sup> et Meshlab<sup>3</sup> ont servi depuis un an à réaliser des acquisitions 3D à haute densité de points.

#### La photogrammétrie

L’acquisition 3D par photogrammétrie est basée sur une technique qui consiste à effectuer des mesures dans une scène, en utilisant la parallaxe

obtenue entre des images acquises selon des points de vue différents<sup>4</sup>, Comme les autres outils de mesure, cette méthode possède une marge d’erreur et une plage d’utilisation qui déterminent sa qualité. En effet, l’incertitude d’un système et sa résolution doivent être prises en compte lors d’un relevé. Ils correspondent à la perte d’information acceptable pour un sujet donné. Lorsqu’elle n’est pas contrôlée, par manque de moyen ou de formation de l’opérateur, cette perte non quantifiable s’avère irréversible, notamment en raison de l’action partiellement ou totalement destructrice de la fouille. Les vestiges peuvent, par un relevé 3D, être documentés de façon plus exhaustive. Cependant, la finesse et l’exactitude de ces documents doivent s’adapter aux dimensions et au niveau de détail des éléments traités.

L’exactitude et la pertinence de cette méthode ont été testées depuis plus d’un an à l’Inrap en Île-de-France. Dans des conditions équivalentes à celles rencontrées sur le terrain, une surface de test a été modélisé grâce à 10 photographies prisent à un mètre du sujet. Elle couvre une superficie 1,3 m<sup>2</sup>, qui correspond par exemple à la dimension d’une sépulture. Le résultat obtenu nous donne une justesse à ± 0,3 mm. La fidélité du résultat est quant à elle de 39 x 10 mm<sup>5</sup>. Ainsi, ces valeurs comparées à la taille du pixel des clichés ramenés à 2400 x 1600 pdi donnent une incertitude inférieure à la taille du pixel. Dans ce cas, les valeurs mesurées offrent un résultat qui peut être considéré comme juste et fidèle par rapport à la référence. Ces réalisations, d’une qualité qui ne peut être atteinte avec une méthode traditionnelle, nous incitent donc à poursuivre notre démarche.

#### La 3D comme documentation scientifique

Comme pour le mobilier, la modélisation de structure facilite la réalisation de vues ortho-rectifiées et permet des figurations en fonction des propriétés géométriques de leur surface. Toutefois, pour que ce travail corresponde à la réalité, le MNS doit être mis à l’échelle et orienté. Ce référencement du modèle 3D impose de faire figurer sur les photographies un repère mesurable comme une mire ou un élément remarquable dont on connaît la dimension. Pour une structure, le simple redimensionnement ne suffit plus, la modélisation doit également être orientée par rapport à un système de projection. Il est alors indispensable, dans ce cas, de coupler les relevés 3D avec des points d’amer issus d’un levé topographique. Ce travail adapté au terrain présente plusieurs atouts. Il permet des enregistrements de sujets difficilement accessibles ou potentiellement dangereux comme les façades de bâtiment ou de grandes coupes. Il est particulièrement approprié dans des contextes urbains et stratifiés où la restitution impose de représenter des profils avec des variations altimétriques parfois importantes. La photogrammétrie offre alors la possibilité de compiler sur un même document un ensemble de structures sur un niveau déterminé, ou un état

de la fouille à un moment donné. La souplesse et le faible investissement de la méthode permettent d’envisager plusieurs relevés par opération. Ils ont pour fonction leur mise à plat afin d’en extraire des plans et des coupes, mais ils peuvent également servir de support à la mémoire. Cette fonction est loin d’être négligeable dans ces contextes où l’enchevêtrement des faits rend leurs lectures difficiles. Comme pour le passage du noir et blanc à la couleur ou de l’argentique au numérique, la 3D constitue une nouvelle étape dans l’évolution de la documentation. Elle n’a pas pour vocation d’être systématiquement publiée sur papier et peut servir d’archive. La 3D est alors conservable et transmissible sous des formats qui autorisent sa manipulation à des degrés plus ou moins avancés.

Cette expérimentation montre que la 3D peut s’inscrire dans la chaine graphique et donne un aperçu du potentiel analytique en en découle. L’acquisition 3D par photogrammétrie s’est révélée souple et adaptée à notre activité<sup>6</sup>. De tous les systèmes de numérisation, l’acquisition 3D par photogrammétrie se révèle la solution couplant le coût d’exploitation le plus faible avec la plage d’utilisation la plus large. Sa limite n’est conditionnée que par les capacités optiques des appareils photographiques, notamment pour les vues rapprochées. Toutefois, cette technique correspond à un mode de relevé qui peut être complété, pour les petites surfaces, par d’autres systèmes d’acquisitions 3D comme les scanners. Ainsi, la photogrammétrie associé au scanner manuel permet de réaliser l’ensemble des numérisations allant du petit mobilier jusqu’à l’échelle du chantier.

Les modélisations 3D sont à la base de l’analyse du relief par des fonctions mathématiques qui permettent d’en révéler les anomalies. Elles constituent une réplique virtuelle qui supporte tout type d’interventions sans mettre en danger le matériel original. Elles permettent les simulations physiques ou mécaniques sur des vestiges afin d’en dévoiler le fonctionnement, la façon dont ils ont été détruits ou dont ils ont résisté à leur environnement. Toutefois, ces approches supposent un changement de culture de notre part. Concevoir ou envisager notre réflexion en 3D est un processus intellectuel qui nous fait basculer du concept d’empilement vers celui d’emboitement. Le potentiel d’exploitation en archéologie est loin d’avoir été totalement exploré et se rapprocher de l’univers de l’ingénierie permettrait de mieux l’appréhender.

L’illustration archéologique est porteuse d’informations que les spécialistes savent décrypter mais elle est difficilement exportable telle quelle hors de la communauté scientifique. La représentation des faits par le dessin répondait jusqu’ici à une nécessité imposée par le mode de transmission de l’information qui était exclusivement produit sur des supports de communication en 2D. Pour s’adapter à ce format, le fait archéologique était traduit dans un langage graphique qui devait

être connu à la fois par son auteur et par le lecteur. Ce mode de figuration ne permettait alors pas le partage de ces données en direction d’un large public. Les modèles numériques ne doivent donc pas servir uniquement à fournir des vues fixes. L’informatique et les modes de diffusion qui y sont associés doivent permettre de conserver et diffuser cette documentation sans perte de qualité. Elle pourra être ainsi consultable et surtout manipulable pour que chacun puisse se faire sa propre opinion sur les éléments modélisés.

Les modèles numériques sont perçus simplement comme des moulages ou des maquettes et permettent de s’affranchir des conventions de représentation. La 3D est comprise par tous de façon intuitive en faisant appel à un sens inné et non pas à un acquis culturel : dès qu’un modèle s’anime, en suivant un scénario ou les manipulations d’un observateur, son volume est immédiatement appréhendé. Ce type de relevé représente dès lors un potentiel de diffusion plus large, aussi bien scientifique que grand public.

<b>Références bibliographiques</b>
ADROT D., À paraître, « <span> </span> <i>la Grande Pièce/la Rangée/les Rues de Marne/Près le Moulin Saint Faron/les Oudelains/les Grandes Malsanges</i> <span> </span> » à Citry (77), Rapport de diagnostic d’archéologie préventive, Inrap.
MONDOLONI A., À paraître, « <span> </span> <i>Le derrière des Moulins</i> <span> </span> » à Mours (95), Rapport de fouille d’archéologie préventive, Inrap.
SARON E. « <span> </span> <i>Carrière</i> <span> </span> » à Ballancourt (91), Rapport de diagnostic d’archéologie préventive, Inrap.

### Deux exemples de modélisation en 3D de sites urbains

Mehdi Belarbi, Inrap

L’enceinte de Philippe Auguste à Paris, vue de l’Hôtel des Monnaies, quai de Conti, a mis au jour la face interne de l’enceinte de Philippe Auguste sur une profondeur de 4 m7. Un deuxième diagnostic, réalisé en 2011, dans la même cour, a dégagé le parement externe de cette enceinte sur une hauteur identique8. L’acquisition 3D par photogrammétrie testée à l’Inrap a permis de modéliser la maçonnerie découverte lors de cette deuxième intervention.

L’enceinte de Philippe Auguste à Paris
En 2010, une première intervention dans une cour de l’Hôtel des Monnaies, quai de Conti, a mis au jour la face interne de l’enceinte de Philippe Auguste sur une profondeur de 4 m<sup>7</sup>. Un deuxième diagnostic, réalisé en 2011, dans la même cour, a dégagé le parement externe de cette enceinte sur une hauteur identique<sup>8</sup>. L’acquisition 3D par photogrammétrie testée à l’Inrap a permis de modéliser la maçonnerie découverte lors de cette deuxième intervention. La numérisation a, dans ce contexte, de nombreux avantages. La fouille en puits blindé, effectuée par des puisatiers, ne permet pas une observation globale de la stratigraphie qui est masquée par les boisages mis en place au fur et à mesure du terrassement. Les étaitements, indispensable à la sécurité, sont également des obstacles à l’examen des parois. La 3D facilite la réalisation de relevés globaux débarrassés des éléments techniques qui en perturbe la lecture et fournit une documentation qui autorise une étude architecturale [ill. 1]. De plus, parce que les photographies numériques prises par le responsable d’opération, lors du premier

- La méthode est optimisée si l’on utilise des focales courtes, des drones et des microprocesseurs puissants permettant des calculs rapides.
- Responsable d’opération : Paul Celly, *Inrap* (2011).
- Diagnostic : Paul Celly, *Inrap*, 2010 et 2011.

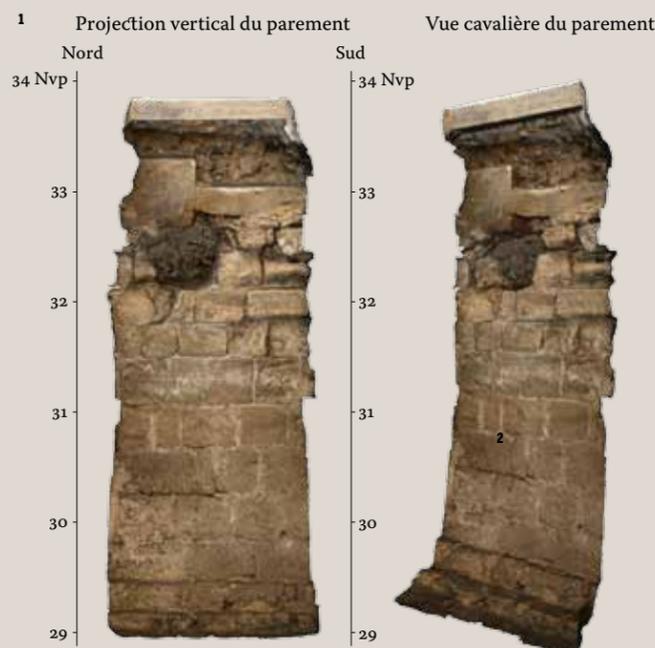
<sup>[1]</sup> Logiciel écrit par Noah Snavely (http://phototour.cs.washington.edu/bundler/).

<sup>[2]</sup> Logiciel écrit par Yasutaka Furukawa (http://grail.cs.washington.edu/software/cmvs/).

<sup>[3]</sup> Logiciel open source (http://meshlab.sourceforge.net/).

<sup>[4]</sup> http://fr.wikipedia.org/wiki/Photogrammétrie.

<sup>[5]</sup> La documentation est trop longue pour être développée ici mais le protocole de mesure et les résultats sont disponibles sur demande aux auteurs.



1. Enceinte de Philippe-Auguste dans l'Hôtel de la Monnaie, quai de Conti à Paris. Vue des contraintes du diagnostic et élévation du mur d'après la modélisation en 3D.

diagnostic, se complétaient, il a été possible de calculer un modèle 3D de l'intérieur de cette enceinte. La compilation des deux modèles permettra de proposer une vision globale et inédite de cette portion d'enceinte, malgré le décalage de ces interventions dans le temps et dans l'espace. Enfin, ce type de relevé a un intérêt pour la sécurité et pour l'organisation du travail. Il peut être effectué à distance de zones dangereuses à relever manuellement et il limite le temps de présence dans le sondage : de fait, le temps de prise de clichés est plus court que celui d'un relevé traditionnel dessiné, ce qui diminue en conséquence le temps d'attente des terrassiers. Ainsi, ces deux activités alternent avec une plus grande efficacité.

#### L'église Saint-Pierre-Saint-Paul de Gonesse

La fouille de cette église gothique du Val-d'Oise a été effectuée en deux phases<sup>1</sup>. La première eut lieu dans le cœur et le déambulatoire de l'abside. Durant l'été 2012, l'intervention s'étendra à la nef. Un premier modèle numérique a été réalisé à partir de 5 campagnes de topographies et de relevés par photogrammétrie. Ce document restitue un instant « T » de la fouille, où le principal niveau de sépultures a été dégagé (ill. 2). Cette opération archéologique se limitant au sous-sol, aucun relevé de bâti n'était prévu. Mais la reconstruction tridimensionnelle a permis un relevé architectural intégrant les voûtes et les différents éléments qui entourent les zones fouillées. Elle a mis en évidence le tracé régulateur sur le chœur de l'église et a permis d'établir la position de son centre théorique<sup>2</sup>. Cette information, essentielle dans ce contexte, facilitera la mise en perspective des fondations découvertes avec l'édifice. Ces relevés peuvent donc être replacés dans le volume entier du chœur. Les moulures des voûtes, des bases de colonnes ou des chapiteaux sont visibles et exploitables pour toutes sortes d'observations. La première phase consistait surtout à fouiller un ensemble de tombes accumulées durant près de dix siècles ; ce type de fouille s'effectue essentiellement à plat, avec prises de données topographiques et altimétriques nombreuses pour conserver un maximum d'informations sur la position des fosses sépulcrales et des squelettes. Aucune berme ne peut aisément être conservée et les relevés en coupe sont rares. La modélisation permet, là encore, de réaliser a posteriori ces profils de façon rapide, précise et pertinente, qu'il s'agisse de relevés entre sépultures ou intégrant le volume général du bâtiment (ill. 3). De la même façon qu'une photographie générale, ces MNS conservent toutes les informations sur le relief et les volumes des vestiges. Ils constituent ainsi une base de données pour analyser les relations altimétriques des structures et effectuer des mesures dans les 3 dimensions. Plus simplement, ils laissent la possibilité de naviguer dans le modèle pour visualiser l'environnement lors de la fouille ou des interventions ultérieures.

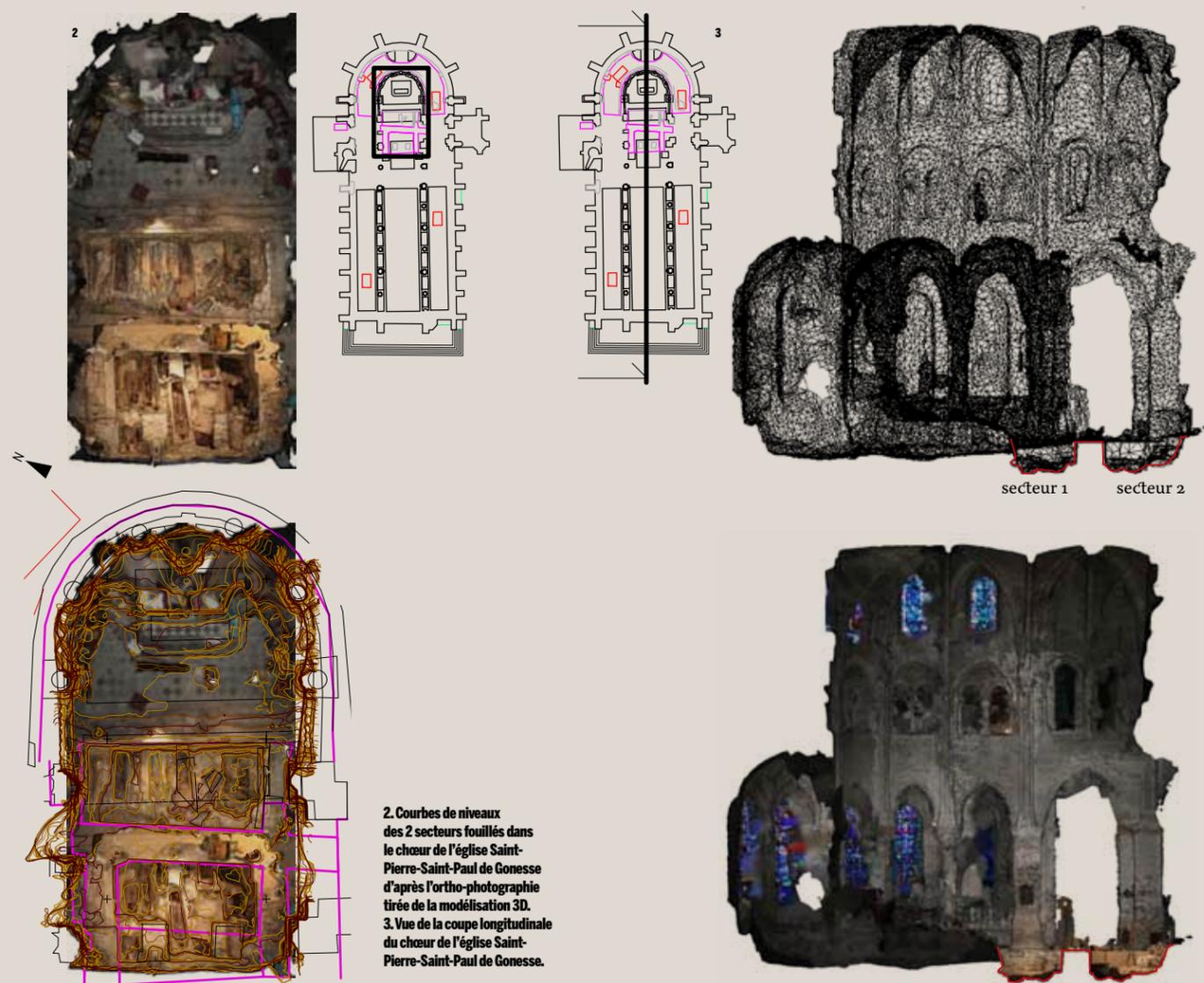
#### Représenter des mobiliers complexes grâce à la 3D

Pascal Raymond, Inrap

Le mobilier lithique de grandes dimensions, lourd et encombrant, est particulièrement complexe à relever. Il doit néanmoins être représenté dans son contexte, notamment par rapport au plan horizontal (ill. 1), mais également en vue géométrale selon sa morphologie. De toutes les méthodes disponibles, la modélisation 3D paraît la plus appropriée et simplifie la réalisation de cette documentation. Par ailleurs, le souci d'accessibilité des vestiges ne s'explique pas seulement par le caractère destructeur de notre activité, mais parfois par des raisons économiques, légales ou physiques, notamment pour les mégalithes. L'un des intérêts de cette modélisation est également le retour possible à une information initiale d'une grande richesse.

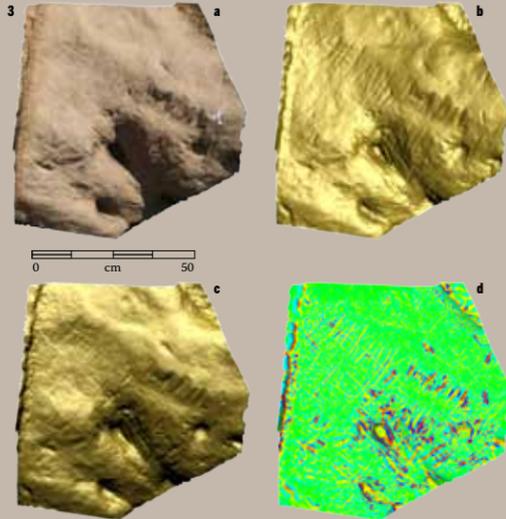
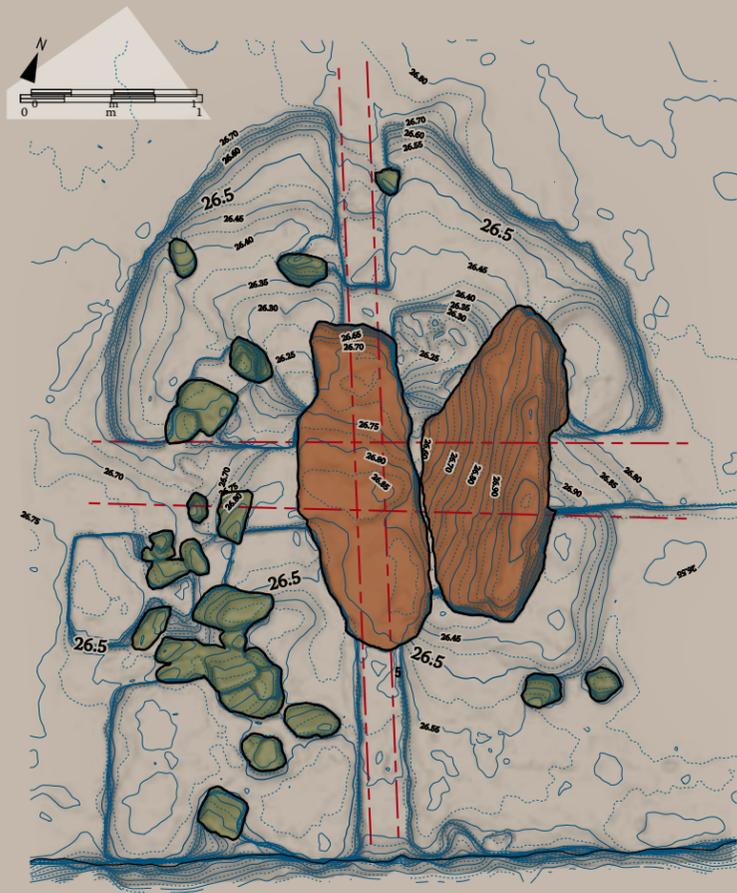
#### La modélisation de mégalithes gravés

Trois des blocs de grès gravés découverts à l'occasion d'un diagnostic à Citry (Seine-et-Marne) (Adrot, 2012), ont ainsi été modélisés in situ, puisqu'ils ne pouvaient pas être déplacés (surface de 4 m<sup>2</sup> et poids de près de 3,5 tonnes pour le plus volumineux). Lors d'un diagnostic, la collecte de l'information doit se faire rapidement. Par ailleurs, l'étude se fondant sur l'échantillonnage, elle doit concilier le besoin d'identification avec la nécessité de ne pas endommager un éventuel site. Enfin, l'étude de ce type de vestiges nécessite des moyens (transport adapté, temps nécessaire au prélèvement et à l'analyse) qui n'ont pu être mis en œuvre dans ce cadre. La nécessité de reporter certaines observations imposait d'autant plus un enregistrement rigoureux de leur géométrie que le projet d'aménagement (carrière) pouvait être annulé ou modifié, ce qui aurait rendu inaccessibles ces blocs durant une période indéterminée. La modélisation 3D des blocs a donc été utilisée pour l'enregistrement de leur proportion avec un niveau de précision permettant la restitution des principales gravures. Avec une moyenne de 40 photographies par modèle 3D, nous avons produit deux MNS<sup>3</sup> pris sur le terrain et deux autres après nettoyage des parties du bloc 34-15, cassé lors du diagnostic (ill. 2). Associées à ces relevés, des portions gravées de 0,5 m<sup>2</sup> ont fourni une documentation supplémentaire avec une résolution inférieure au millimètre sur ce qui correspond, pour chaque modèle, à un nombre de polygones compris entre 1 et 1,5 million. À partir de ces documents, il est possible de faire ressortir les gravures pour fournir des illustrations préalables à leur étude. La surface de l'un des blocs est représentée ici avec les couleurs enregistrées grâce aux photographies, mais également avec une teinte neutre en faisant varier la source d'éclairage (ill. 3.A, B et C). Un autre mode de représentation révèle également les

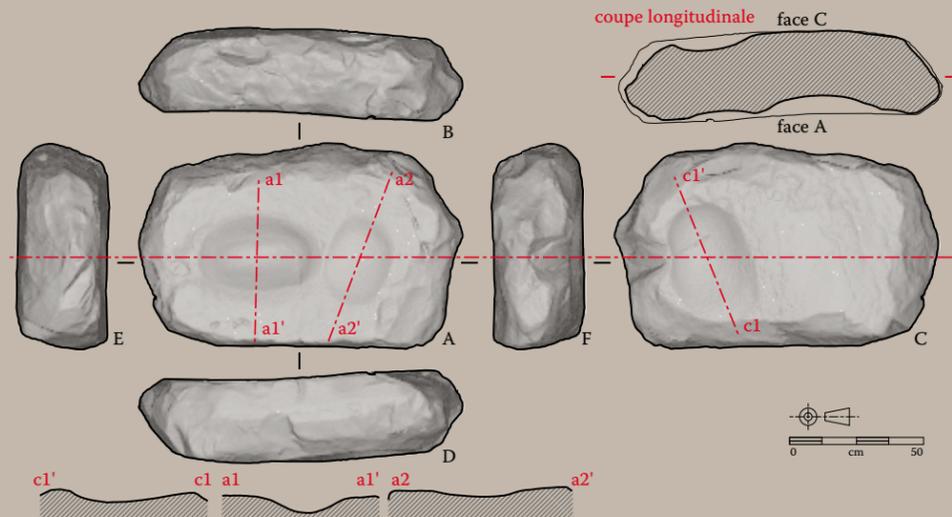


2. Courbes de niveaux des 2 secteurs fouillés dans le chœur de l'église Saint-Pierre-Saint-Paul de Gonesse d'après l'ortho-photographie tirée de la modélisation 3D.  
3. Vue de la coupe longitudinale du chœur de l'église Saint-Pierre-Saint-Paul de Gonesse.

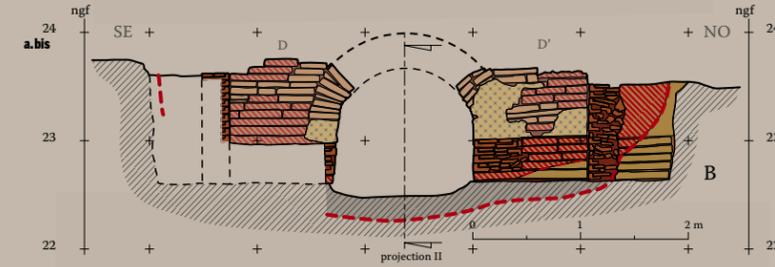
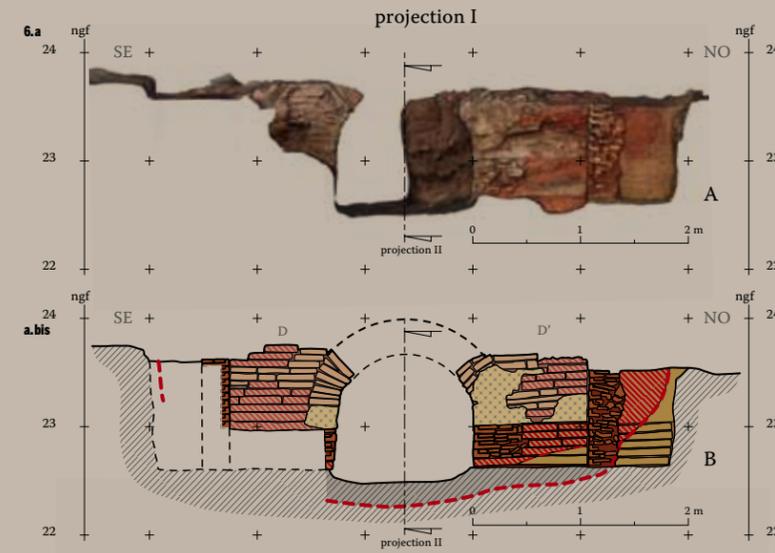
1. Responsable d'opération : Nathalie Karst, Inrap (2011). Fouille : août-décembre 2011 et août 2012  
2. Selon Marc Viré, Inrap.  
3. MNS : Modèle Numérique de Surface. Dans ce cas, il correspond à un maillage constitué de TIN (Triangular Irregular Network), calculé à partir du nuage de points de haute densité.



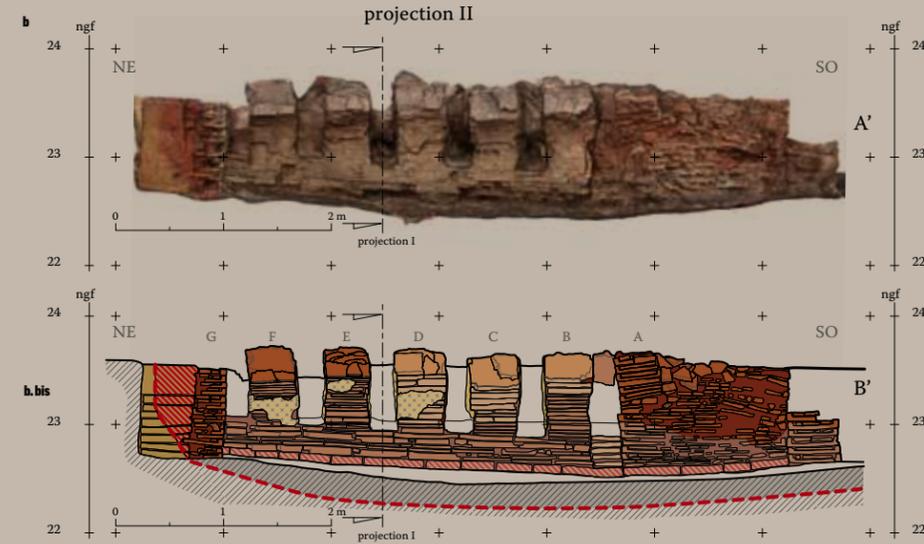
1. Menhirs abattus de Champagnes-sur-Oise. Plan topographique des blocs en cours de fouille. Illustration obtenue par photogrammétrie et géo-référencement par un levé topographique.  
 2. Vue des blocs gravés lors de leur découverte en contexte de diagnostic.  
 3. Détail des gravures du bloc N° 34-15 modélisées d'après les photographies prises sur le terrain.  
 a. en couleurs vraies ;  
 b. et c. en lumière rasante ;  
 d. affichage des rayons de courbure.  
 4. Vue du bloc de grès aménagé en meule découvert sur l'opération de Ballancourt-sur-Essonne, dégagé lors du diagnostic.  
 5. Représentation géométrale et coupes du bloc de grès de Ballancourt-sur-Essonne.



1. Meule étudiée par Cécile Monchablon découverte sur le diagnostic de Ballancourt-sur-Essonne : Saron E., 2012, Carrière de Ballancourt (rapport en cour de rédaction).



6. a et a.bis : Vues du modèle 3D en projection parallèle verticale selon l'axe de coupe du four ;  
 b et b.bis : calepinage de l'élevation du four établie sur la base du modèle 3D.



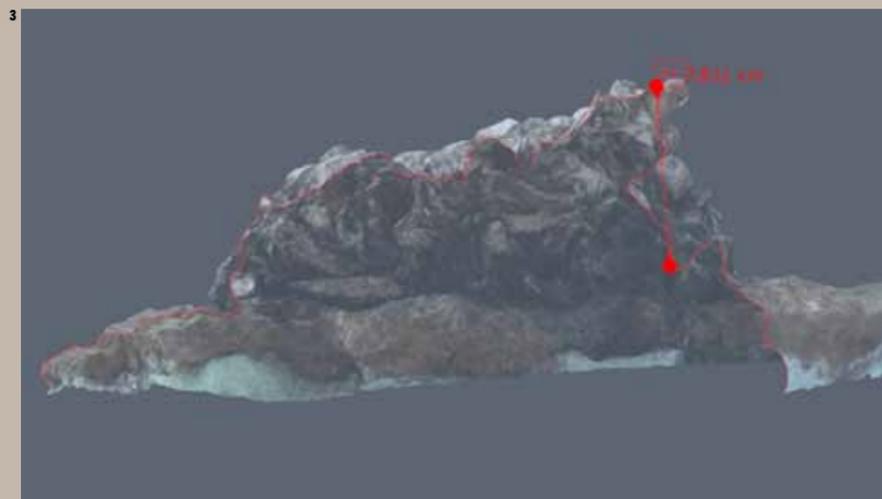
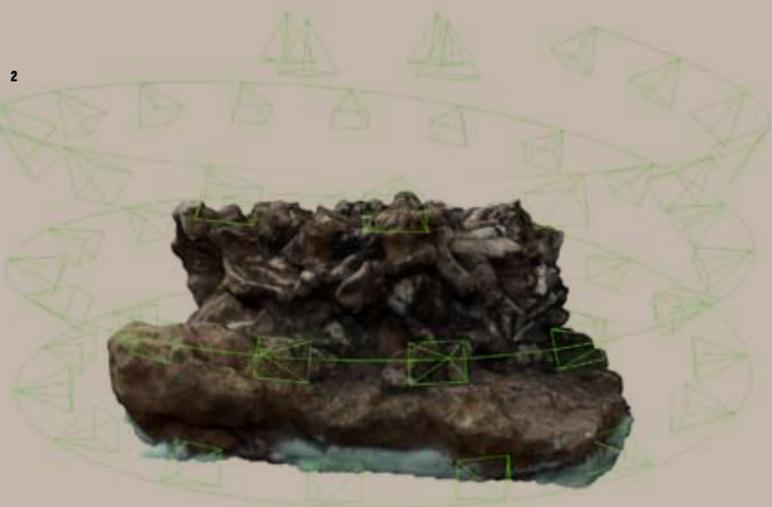
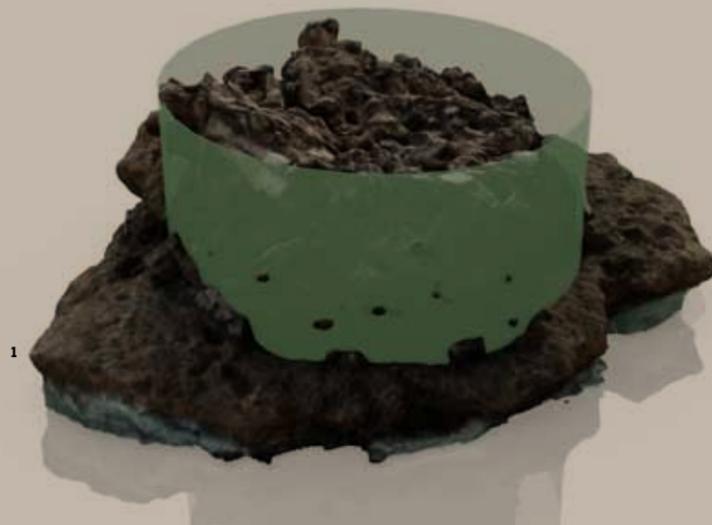
matériaux en parment  
 - brique  
 - tegulae  
 - brique crue rubéfiée  
 - enduit d'argile  
 matériaux en coupe  
 - brique  
 - tegulae  
 - brique crue  
 - brique crue rubéfiée  
 - limite de rubéfaction

anomalies du relief par l'analyse de la surface qui fait ressortir les rayons de courbures (ill. 3.D). Dans le meilleur des cas, ces gravures sont dessinées manuellement sur un support transparent plaqué sur le bloc. L'irrégularité du support produit une déformation du relevé qui, une fois remis à plat, génère inévitablement des anamorphoses. La méthode proposée est une autre approche basée sur la figuration des principales gravures par leur restitution numérique dans un plan de projection paramétré. Ces documents fournissent une base topographique à partir desquelles une analyse pourra être réalisée. En dissociant le relevé de l'étude, on peut mieux distinguer ce qui est géométriquement juste de ce qui est authentique d'un point de vue anthropique.

Les meules aménagées sur un bloc de grès du Néolithique final découvertes à Ballancourt-sur-Essonne<sup>1</sup> (Essonne) (Saron, 2012) illustrent un autre exemple de mobilier difficile à dessiner (ill. 4).

La diffusion de l'information passe par sa codification. La figuration des faits répond donc à des conventions qui s'adaptent à une nécessité d'analyse comme pour le dessin lithique, la céramique ou les différents types de mobilier. Ce qui caractérise le dessin archéologique de façon générale, c'est l'application des normes graphiques de la géométrie descriptive et principalement la forme géométrale. Ainsi, la projection parallèle demeure la mieux adaptée à la prise de cote sur le dessin, ce qui facilite les comparaisons. Cependant, cette mise à plat du mobilier demeure un exercice difficile lorsque celui-ci est volumineux. Bien que la forme du bloc de Ballancourt s'inscrive dans un parallélépipède, la projection de chacune des 6 faces selon des plans perpendiculaires les uns aux autres est un travail ardu. Deux faces d'utilisation sont aménagées avec des meules et des surfaces polies. Le bloc présente aussi une série d'éclats d'épannelage et ses dimensions, 125 x 80 x 35 cm, pour un poids de 475 kg, interdisent

1. Illustration du protocole des prises de vues.
2. Modélisation d'un contenant hypothétique sur une acquisition tridimensionnelle d'incinération.
3. Coupe et mesure réalisées avec Adobe Acrobat sur une incinération modélisée en 3D.



1. Fouille « Le derrière des Moulins » : A. Mondoloni, *Inrap*, 2011/2012 ; étude du four : Aurélie Aligri, *Inrap*.

sa manipulation sans moyen de levage. Réalisées en deux phases, 133 photos ont produit deux MNS regroupés en un modèle de 2,34 millions de faces avec une résolution de 1,4 mm. Ce document est assez précis pour restituer les éclats, les cupules de broyage et jusqu'aux détails des principales marques de bouchardage. Ces caractéristiques morphologiques et la qualité des traces d'utilisation ont ainsi justifié la modélisation du bloc afin d'en extraire des vues orthogonales [ill. 5]. La 3D a également facilité la création de coupes et profils selon des plans paramétrés ou libres pour fournir des informations complémentaires. Les illustrations obtenues constituent une base graphique géométriquement fiable sur laquelle les observations et les résultats d'analyse peuvent être reportés.

#### *Le modèle de la 3D comme support à l'enregistrement*

Deux étapes de travail doivent être distinguées : d'une part, l'enregistrement des géométries et, d'autre part, l'interprétation des vestiges. La prise de cotes par des moyens traditionnels accapare une part importante du temps qui pourrait être affecté à l'étude. En dissociant ces deux tâches et en éliminant au maximum la part d'interprétation lors des prises de mesure, on crée un cadre plus juste pour l'analyse. Grâce à sa souplesse pour réaliser des vues géométrales, la modélisation permet d'extraire des images en projection orthogonale qui servent ensuite de support à un relevé interprété.

Nous avons procédé de cette façon pour un four de tuilier<sup>1</sup> découvert à Mours (Val-d'Oise) (Mondoloni, À paraître). Les coupes longitudinales et transversales de l'alandier, de la chambre de chauffe et de la maçonnerie ont été modélisées en un MNS de 1,47 million de faces. Ce document, très riche et géométriquement juste, a été projeté selon les axes de coupes et imprimés au 1/20<sup>e</sup> [ill. 6.a et a.bis]. Ces représentations ont permis l'enregistrement des gestes du constructeur sur un calque en retombe. Ainsi, nous avons produit un plan de calepinage qui décrit les différents matériaux [ill. 6.b et b.bis], les phases de construction et leurs réparations. La phase de description sur le terrain a été plus courte et facilitée par ces supports imprimés grâce auxquels il n'était plus utile de prendre des mesures pour faire figurer les différents éléments.

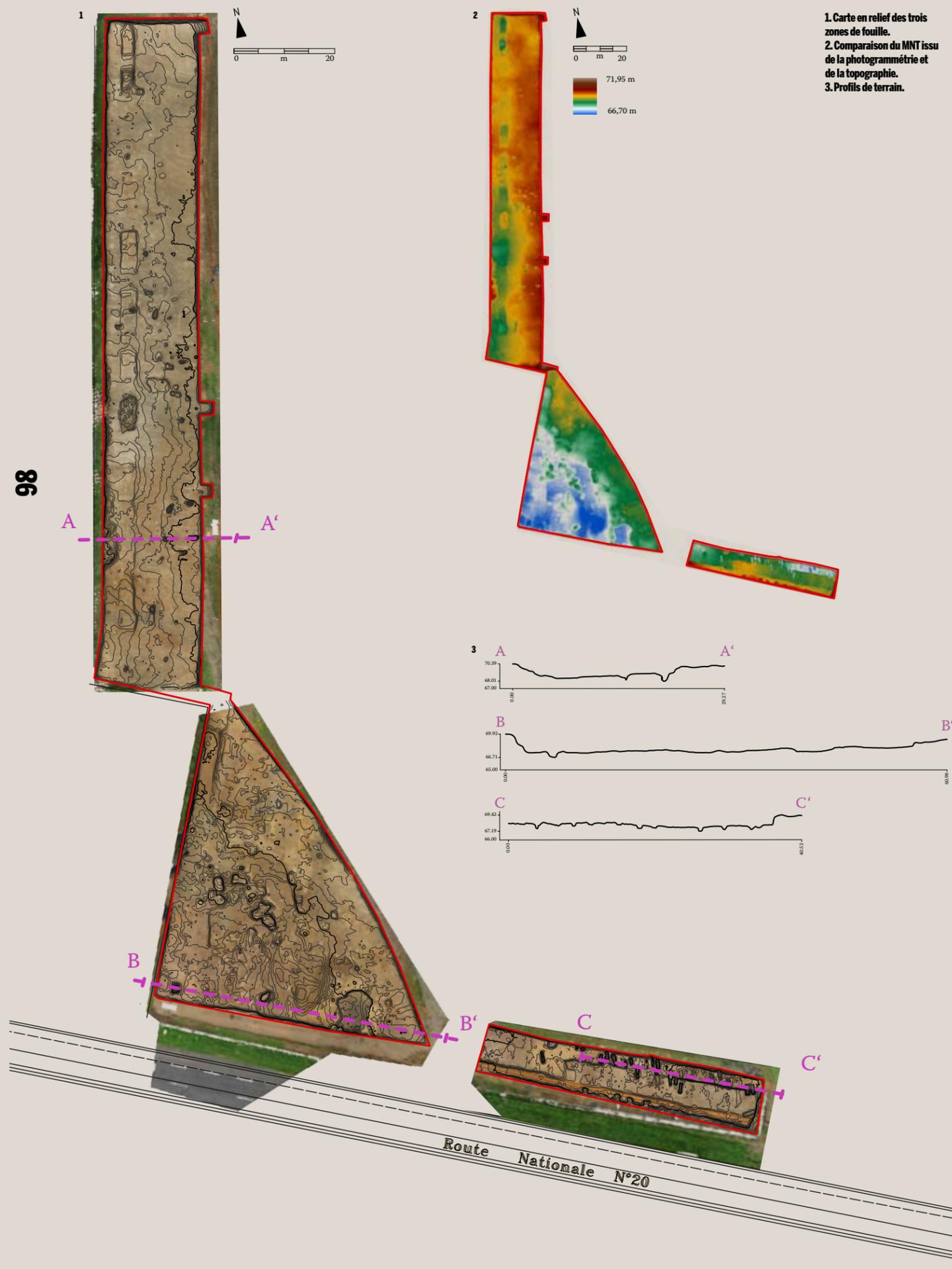
#### **La modélisation d'incinérations**

Nicolas Saulière, *Inrap*

Les premiers essais de la photogrammétrie en archéologie réalisés par les équipes *Inrap* d'Île-de-France ont porté sur des structures complexes (four de tuilier, sépulture...), mais aussi sur des objets de grandes dimensions (menhirs). Cette technique de modélisation tridimensionnelle a été réalisée sur des objets de moindre échelle lors de

l'étude de la nécropole de la « Plaine du moulin à Vent » à Cesson (Seine-et-Marne). Sur ce site furent mises au jour 170 sépultures secondaires à crémation, datées de l'âge du bronze moyen et final. Notre collègue anthropologue Anne-Gaëlle De Kepper a suggéré d'en modéliser un échantillon. En effet, la majorité des dépôts cinéraires étant constituée d'amas osseux dont le contenant en matériau périssable n'a pas été conservé, les modèles 3D devaient servir à en restituer la morphologie initiale. Les résultats obtenus permettront de constituer une base de données pour ce type de dépôt. L'étude étant en cours, seule une ébauche des résultats est présentée ici. Sont abordées la méthodologie adoptée pour la modélisation, les contraintes dues à ce type de mobilier, et les études envisagées.

Deux types de modèles ont été réalisés en fonction de l'état de conservation des dépôts cinéraires. Si les ossements sont très fragmentés et non identifiables sur place, le modèle sert à une étude morphologique de l'amas osseux, afin de déterminer la forme du contenant. Dans ce cas, le nombre de photographies a été limité afin d'obtenir des modèles relativement légers et d'optimiser le temps de calcul. Mais si les ossements sont bien conservés et identifiables, il est aussi possible de voir leur répartition au sein de l'amas selon les différentes régions anatomiques du corps humain (crâne, tronc, membres). Le nombre de clichés augmente alors selon l'importance accordée aux détails. Après prélèvement et étude en laboratoire de l'amas osseux, l'incinération est installée de façon à effectuer une couverture photographique complète de la structure. Le protocole consiste en quatre prises de vue à la verticale du sujet, légèrement décalées les unes des autres afin de s'adapter à la contrainte de la forme cylindrique des incinérations et à la nécessité de réaliser des prises de vue se recouvrant par moitié ; puis furent réalisés plusieurs clichés en spirale autour de l'incinération [ill. 1]. Entre 40 et 90 photographies ont ainsi été réalisées pour chaque incinération en fonction de la résolution visée. Plusieurs contraintes optiques sont à noter. Tout d'abord, plus les objets sont petits, plus il est difficile d'avoir une bonne profondeur de champ. Or les photographies comportant des plans flous génèrent du « bruit » (points parasites n'ayant aucune position cohérente). Par ailleurs, il est nécessaire de corriger les effets des inévitables situations de contre-jour, puisque, en tournant à 360° autour des incinérations, il arrive d'être face à la source de lumière. Il convient alors de légèrement surexposer les photographies pour éviter d'avoir un sujet trop sombre. Malgré ces précautions, il a fallu opérer un important travail d'épuration sur les nuages de points avant de générer, à partir du logiciel Meshlab, un maillage de polygones. La morphologie des incinérations a été étudiée à l'aide du logiciel Blender qui permet de créer des formes géométriques et de les comparer au modèle issu de Meshlab. On peut, de la sorte,



1. Carte en relief des trois zones de fouille.  
2. Comparaison du MNT issu de la photogrammétrie et de la topographie.  
3. Profils de terrain.

1. Responsable d'opération : Paulette Dubovac, Inrap.

confirmer ou infirmer des hypothèses de contenants et réaliser des illustrations [ill. 2]. De plus, tous les modèles peuvent être fournis aux différents acteurs de l'étude au format pdf 3D, facilement lisible avec Adobe Reader ou Acrobat [ill. 3], qui permet de visionner les acquisitions 3D à l'échelle, de faire des mesures et de pratiquer des coupes. La photogrammétrie a ici permis de trouver une nouvelle approche d'étude des incinérations. Différentes hypothèses de formes de contenant peuvent être confrontées à une représentation virtuelle, afin de les valider – ou non – et de les illustrer. De plus, la forme et les couleurs de faits archéologiques, qui seront à terme démantelés par la fouille, peuvent être sauvegardées. Enfin, cet enregistrement peut alimenter une base de données utile pour des études ultérieures.

### Modélisation de terrain par prise de vue embarquée

Régis Touquet, Inrap

Une campagne de prise de vue aérienne par drone a été réalisée sur l'opération archéologique de Morigny-Champigny<sup>1</sup> (Essonne), couvrant 5 000 m<sup>2</sup> et divisée en trois zones distinctes. La couverture photographique complète de l'emprise et l'importante quantité d'images produites par un tel procédé, a permis d'exploiter les clichés dans un travail de modélisation de leur géométrie. Il est en effet possible, grâce à la technique de la photogrammétrie, d'exploiter des images diverses tant pour leur échelle que par les types d'appareils de prises de vues. Outre la possibilité de mettre à l'épreuve cette technique sur une grande surface, le but était de créer un modèle numérique de terrain précis des différentes zones de fouilles et ce, uniquement à partir des documents photographiques. La société Kyuaero a réalisé les prises de vues aériennes à l'aide d'un drone commandé depuis le sol. Il s'agissait d'obtenir des photographies zénithales ainsi que des photographies angulaires, le drone survolant alors de manière concentrique les emprises à traiter. Les clichés ont été pris en mode rafale, à environ 20 mètres du sol, à raison d'une photographie par seconde. Le couvert nuageux entraînant une faible lumière le jour des prises de vue, la multiplication des images a ainsi été privilégiée. Un fond photographique d'une centaine de clichés exploitables par zones a été obtenu. Ces données raster brutes, d'une définition de 12 millions de pixels, ont ensuite été soumises à des solutions logicielles. Chaque cliché réalisé sur les zones de l'emprise a été traité de manière indépendante par les logiciels libres Bundler, PMVS, CMVS et Meshlab, afin d'en acquérir un modèle 3D à haute densité de points. Trois Modèles Numériques de Terrain (MNT) ont par la suite été calculés, couvrant des surfaces au sol de 600, 1900 et 2500 m<sup>2</sup>. Un MNT se représente

par des faces triangulaires modélisées en 3D, qui traduisent le relief calculé. Le nombre de ces faces dépend davantage de la pertinence géométrale des sources de données utilisées que de la surface du modèle. Les logiciels d'acquisition 3D précités peuvent générer, selon la pertinence des informations, plusieurs millions de faces, offrant ainsi une visualisation très précise et fidèle des sujets traités. Le modèle obtenu doit être orienté selon le système de projection de l'opération. En amont du traitement, des points remarquables sont ainsi levés sur le terrain et déterminés par coordonnées. Ces données correspondent à des points d'angles ou d'arêtes identifiables sur le MNT calculé. Le géo-référencement du modèle en projection et en élévation permet ainsi d'analyser, de manière précise, la topographie existante et de la soumettre aux différents outils de visualisation. Des cartes en relief [ill. 1] des trois zones ont été dressées, facilitant ainsi la lecture topographique et la comparaison des altitudes d'une zone à l'autre. De plus, durant la phase de fouille et de post-fouille, un nombre infini de profils peuvent être exportés du modèle [ill. 3], traduisant graphiquement en 2D les informations du relief. Ces profils de terrains permettent également un contrôle de précision du MNT en le comparant à un levé traditionnel effectué par le topographe. Toutefois, la résolution obtenue par la photogrammétrie s'avère beaucoup plus pertinente, car elle génère un nombre de points topographiques important, trop lourd à mettre en œuvre avec un levé au tachéomètre.

La confrontation des différentes couches superposables que sont le MNT, le plan-masse du site et les images géo-référencées issues de la photogrammétrie facilite la lecture des zones modélisées et permet une approche tridimensionnelle des problématiques. L'analyse des pentes, l'étude du microrelief, le calcul des cubatures font partie des outils utiles au responsable d'opération. La procédure d'acquisition étant simple à mettre en œuvre, elle peut être répétée et permettre ainsi la comparaison précise de différents modèles successifs. Les niveaux d'occupation ou de décapage peuvent alors être documentés au fil de l'opération archéologique. La caractérisation des aspects du relief peut devenir systématique et intégrer une réflexion plus large sur l'implantation des occupations humaines.

### Relevé en 3D d'une structure souterraine médiévale

Chhavy-Cyril Tan, Service archéologique départemental d'Indre-et-Loire

Laurent Fournier, Inrap

La découverte, au cours de l'été 2009, d'une structure souterraine, annexe d'un habitat médiéval, sur le site d'Ormes « Le Bois d'Ormes »