

LE PRISME DE L'IMAGE

LE DOSSIER



PAR ÉMILIE TRÉBUCHET
ET NICOLAS FOUILLET

Ci-dessus, vue des terrassements de 1976 pour les halles de Tours.

© R. Malnoury, Région CVL, Inventaire général (19763702281X).

Ci-dessous, ce relevé de ruines de Jérôme Cock, *Cinquième vue du Colisée à Rome*, gravure, 1551, peut-être considéré comme un ancêtre du dessin technique actuel.

© Rijksmuseum, Amsterdam.



Si l'on parle souvent de la fouille archéologique comme d'une fenêtre ouverte sur le passé, les deux archéologues de l'Inrap préfèrent évoquer des « images fixes d'espaces en cours de décomposition ». L'analogie est donc tentante avec les photographies. Les auteurs reviennent sur certains va-et-vient.

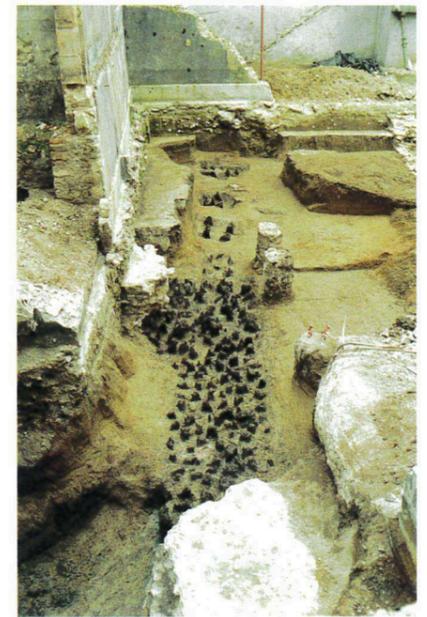
« Enfin, pour le voyageur, pour l'archéologue, aussi bien que pour le naturaliste, l'appareil de M. Daguerre deviendra d'un usage continu et indispensable. Chaque auteur désormais composera la partie géographique de ses ouvrages : en s'arrêtant quelques instants devant le monument le plus compliqué, devant le site le plus étendu, il en obtiendra sur-le-champ un véritable fac simile ».

Par ces mots prononcés en 1839 dans son discours à la Chambre des députés, officialisant l'invention du daguerréotype, l'homme politique et savant François Arago établit un lien direct entre la technique photographique et l'archéologie. Avec son inventeur Daguerre, ils pressentent immédiatement le potentiel d'enregistrement d'un tel outil pour des sciences en pleines effervescences au XIX^e siècle, qui cherchent à relever, documenter, comparer et classer leurs sujets d'étude : la photographie a vocation à révéler le monde dans toutes ses composantes. Leur intuition ne s'est pas démentie et la photographie occupe une place essentielle aujourd'hui dans

les travaux de recherche archéologique, sur le terrain aussi bien que dans les laboratoires. Avec l'évolution des technologies, l'image photographique, et plus largement numérique, tend même de nos jours à supplanter sur le terrain le dessin de relevé manuel, technique apparue dès la Renaissance pour l'archéologie.

Document d'archives

À son usage d'enregistrement, très tôt énoncé, s'ajoute désormais pour la photographie celui de source d'information : avec ses deux siècles d'existence presque achevés et une production qui n'a cessé de croître, elle a pris le statut de document d'archives pour les chercheurs, au même titre que les archives du sol, les plans ou les manuscrits. En ville par exemple, où la densité et la succession des occupations ont formé un enchevêtrement stratigraphique complexe, les archives photographiques – et plus largement iconographiques –, constituent de précieuses ressources pour aborder l'histoire d'un espace ou d'un édifice. D'intention archéologique ou non, quelle que soit



leur destination première (communauté scientifique, tourisme, presse, usage privé, etc.), elles donnent à voir un état du disparu et portent en elles des indices que le regard des archéologues peut décrypter. L'évolution et les transformations du patrimoine bâti, mais aussi, au XX^e siècle, les vestiges d'un sous-sol parfois mis à nu par des activités humaines particulièrement destructrices (guerres, constructions de bâtiments ou de parkings souterrains, travaux de voirie, etc.) sont souvent bien documentés. Les sources visuelles concourent ainsi à la documentation et à l'évaluation du potentiel archéologique, en ville, comme l'ont montré deux projets de recherche menés à Toulouse puis à Tours, et sur tous les territoires. La quête de détails dans les prises de vues peut révéler des installations anciennes, voire des vestiges non fouillés (caves, puits, murs) ou des séquences stratigraphiques devenues inaccessibles. La photographie ancienne est en tout cas devenue incontournable aujourd'hui pour l'étude préalable des sites et, par les traces qu'elle a fixées du passé, constitue une documentation majeure pour leur compréhension.

À Tours, plusieurs photographies des

années 1950 illustrent la découverte de pieux en chêne massifs. Leur analyse a permis de localiser les prises de vues et de les interpréter. Il s'agit de pieux de fondation qui signalent à leur emplacement un édifice monumental antique inédit. Sa présence, qui reste à documenter par l'archéologie, apporte des précisions sur l'étendue et la structuration de l'agglomération antique de *Caesarodunum* (Tours antique). Les archéologues ont pu observer à plusieurs reprises, depuis les années 1990, cette technique de construction sur pieux pour les grands édifices, spécifiquement adaptée aux zones humides et inondables telle que *Caesarodunum*, établie entre la Loire et le Cher.

Cent ans séparent ces deux vues de l'actuelle place Gaston-Paillhou à Tours. Le cliché daté de 1865 ou 1866 apporte des informations essentielles sur des édifices disparus et sur l'évolution récente de cet espace : au plan intermédiaire les premières halles en construction (démontées en 1976) et en arrière-plan l'église médiévale Saint-Clément, entièrement rasée en 1883 pour leur agrandissement. La superposition des plans de l'image renvoie directement à la notion de stratigraphie et

À gauche, extraction de pieux rue Nationale, à Tours, dans les années 1950.

© Société archéologique de Touraine (Fonds Lehoux).
Ci-dessus, pieux de fondation des thermes antiques du lycée Descartes, en 2001.

© Inrap, N. Fouillet.

À Tours, vue de l'église Saint-Clément pendant la construction des halles, en 1865-1866.

© Bibliothèque municipale de Tours (Chambert, L.A. TOURS, Halles. R. 4)

Cette vue est à mettre en parallèle avec la photo en haut de la page précédente.



LE DOSSIER
Région CVL, Inventaire général (coll. Boille).



Enceinte du XIV^e siècle de Tours. Détail des restes du front nord après les démolitions rue de la Poissonnerie, fin des années 1960. Les élévations de l'enceinte médiévale ont toutes été détruites à la fin des années 1960. Les archives textuelles et photographiques livrent des informations essentielles aux archéologues qui ont eu à étudier ses fondations dans les années 1990 et 2000. Ici, une portion documentée par le service régional de l'inventaire avant destruction.

aux successions d'occupation étudiées par les archéologues. Au XX^e siècle, la mécanisation engendre des destructions de grande ampleur. Les halles mais également tout le sous-sol de la place ont été détruits à leur tour en vue de la construction d'un parking souterrain et... de nouvelles halles. En l'absence de réglementation (celle sur l'archéologie préventive date de 2001), les travaux n'ont pas été accompagnés de fouilles. Les archéologues de l'époque ont néanmoins pu établir en

1976 une coupe stratigraphique à partir de leurs observations. Elle s'avère aujourd'hui essentielle pour la compréhension des origines gauloises de la ville.

Les recherches portant sur les archives photographiques de l'archéologie sont quant à elles de plus en plus nombreuses. Elles permettent de revenir sur la connaissance et l'analyse des fouilles anciennes mais, de fait, s'accompagnent aussi plus largement d'une approche historiographique de la discipline archéologique, de ses méthodes et de ses acteurs. On observe que les photographies archéologiques du XIX^e siècle se focalisent historiquement sur les vestiges en élévation, le monumental et les artefacts. Des explications techniques sont avancées (l'appareillage photographique est difficile à mettre en œuvre sur une fouille extérieure) mais il faut probablement aussi attribuer ce constat à des centres d'intérêt spécifiques qui remontent aux débuts de l'archéologie : l'Antiquité gréco-romaine, les monuments historiques ou la collection d'objets. Les modalités d'étude scientifique du sous-sol et de ses vestiges (enregistrement et compréhension de la stratigraphie, des anomalies), alors en pleine construction et

directement soumise au dessin d'interprétation limitent enfin l'utilisation des procédés photographiques. En métropole, les premières photographies de fouilles, de vestiges prises in situ, datent ainsi des années 1860 et restent très rares, anecdotiques. Elles se multiplient au début du XX^e siècle puis progressivement avec l'arrivée d'appareils photographiques de plus en plus accessibles et maniables à partir des années 1950. Technique photographique et discipline archéologique, toutes deux formalisées dans la première moitié du XIX^e siècle, ont manifestement évolué de concert et leurs influences réciproques sont probablement nombreuses. Il est à noter que la photographie d'archéologie, longtemps cantonnée à l'enregistrement et à la mémorisation d'édifices en danger ou en voie de disparition, ainsi qu'à celui des collections d'objets, a pris un nouvel essor à la fin du XIX^e siècle avec l'apparition des procédés photomécaniques d'impression. Ces derniers ont offert en effet à la communauté des chercheurs la possibilité de partager l'image de manière inédite. La publication et la diffusion des clichés ont donc sans doute directement induit un regain d'intérêt pour la photographie mais ont pu également lui assigner

alors un rôle réducteur d'illustration des résultats.

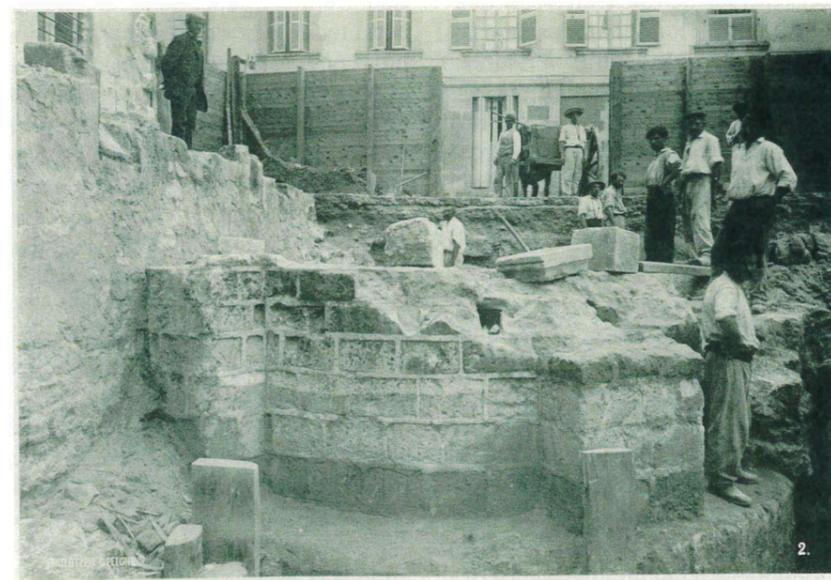
Productions actuelles

Longtemps réduit à l'illustration des observations de terrain et du discours scientifique, l'usage d'enregistrement scientifique de la photographie reprend un véritable essor depuis une quinzaine d'années. Alors que la photographie argentique était économisée et parfois techniquement mal appréhendée par les archéologues, souvent des photographes amateurs depuis les années 1950 avec la simplification des appareils, les facilités nouvelles du numérique (capacités de mémoire étendues, développement instantané, automatisation des réglages, etc.) entraînent une systématisation des prises de vues et transforment les pratiques d'enregistrement et d'analyse des vestiges. Aujourd'hui, chaque fait archéologique est photographié, en coupe comme en plan, de manière isolée et dans son contexte, à différentes étapes du processus de fouille. Cet enregistrement peut s'accompagner d'un relevé graphique, parfois partiel (dessin en coupe seul, par exemple) mais également, dans certains cas, s'y substituer entièrement. La photographie va jusqu'à



Vue du théâtre antique de Toulouse, révélé par les travaux de J.-J. Esquié, 1869-1871. Les vestiges photographiés sont ceux des gradins du théâtre antique observés par Esquié sous la maison Jèze à Toulouse (n° 1 de la rue de Metz). Un égout courait sous les fondations des gradins. C'est la plus ancienne photographie de fouilles connue pour la ville de Toulouse.

Ci-dessous, fouille à Mer (41), Les Gaudines, 2007. Fouille du dépôt de l'âge du Bronze en 2023.



Fouilles archéologiques sur l'emplacement de la future basilique Saint-Martin de Tours. Phototypie de 1886.

Extrait de Casimir Chevalier, *Les fouilles de Saint-Martin de Tours : recherche sur les six basiliques successives élevées autour du tombeau de Saint-Martin*, Tours : L. Péricat, 1888.



prendre l'usage d'une note ou d'un brouillon éphémère, qui a vocation à être effacé rapidement. Prendre un cliché devient donc un geste banal mais s'accompagne d'une véritable anticipation de son usage pratique pour l'étude archéologique, entre support de dessin par ordinateur et simple aide-mémoire dans nos deux exemples. La qualité, l'intégrité et la conservation du document créé doivent pourtant être assurées, dans le cadre d'une production de plus en plus massive et difficilement contrôlable. C'est d'ailleurs un enjeu majeur aujourd'hui pour l'archéologie que de maîtriser la qualité scientifique et la préservation à long terme de ses images numériques.

La photogrammétrie est exemplaire pour comprendre les transformations en cours et observer ce qui se joue du point de vue méthodologique. Elle produit en effet un modèle numérique en trois dimensions, à partir d'un nuage de points calculé depuis une couverture

photographique en deux dimensions. Un passage s'opère entre « l'écriture avec la lumière » (littéralement, la photographie) et l'écriture par la mesure. L'image produite par traitement logiciel embarque avec elle des données chiffrées de géoréférencement et offre la possibilité, ex situ, d'effectuer des mesures et des analyses. Elle devient progressivement hybride, au croisement du reflet et du calcul de la réalité, de la photographie, du relevé, du dessin et de l'hypothèse scientifique. En archéologie du bâti, les relevés pierre à pierre, chronophages, sont ainsi remplacés depuis quelques années par des relevés photogrammétriques couplés à des croquis d'observation. Le dessin d'interprétation et d'analyse est réalisé directement sur le modèle numérique, en laboratoire. S'agit-il d'un détachement avec le réel ou d'un simple gain de temps sur l'observation directe ? Quelle confiance porter à ces reconstructions numériques de vestiges ? De nouvelles approches sont-elles en

voie d'exploration à travers ces outils ? Autant de questions dont s'emparent désormais la communauté des chercheurs et les spécialistes de l'image.

Les nouvelles technologies de l'image font certes évoluer les pratiques des archéologues, mais elles font émerger de nouvelles créations. L'utilisation du drone est en bon exemple. Accessible et maniable, il répond aujourd'hui au besoin historique de l'archéologue de prendre de la hauteur pour observer à distance et de manière panoramique ses sujets, percevoir l'intégralité de sa zone de fouille, et détecter éventuellement des anomalies. Les prises de vues photographiques se multiplient, à des hauteurs inaccessibles auparavant et sous des angles nouveaux, proposant, au même titre que la photogrammétrie ou que les productions de l'imagerie

(radiographie, tomographie, Lidar, géophysique, etc.), une nouvelle une nouvelle culture visuelle de la discipline, du terrain et des objets, mais aussi des paysages et des activités humaines dont ils sont les témoins. Les images ainsi produites nous rappellent par ailleurs que l'objectivité scientifique peut aller de pair avec la recherche d'une esthétique des vestiges. ■

Pour approfondir le sujet

TRÉBUCHET (E.), FOUILLET (N.) (dir.), *Creuser l'image. Archéologie et photographie à Tours*. Tours : PuFR, 2024.

TRÉBUCHET (E.), JACQUET (C.), *Dans l'œil du viseur. La photo révèle l'archéo*. Catalogue de l'exposition présentée du 14 mai au 20 septembre 2015, Toulouse, Musée Saint-Raymond, 2015.

YELLES (A.), « Archéologie et photographie ». *Les Nouvelles de l'archéologie*, n° 170, déc. 2022.

Vue prise par drone de la fouille des casernes Beaumont de Tours en 2024.
© B. Beauchesne, Inrap.

Étude de bâti à Loches, 3 place du Marché aux légumes, 2024.
À gauche, le relevé photogrammétrique augmenté d'une interprétation par le dessin. À droite, le dessin par ordinateur établi à partir de la photogrammétrie, avec interprétation et phasage archéologiques.



Crédit : P. Gilento, Inrap.



L'IMAGE 3D AU SERVICE DE L'ARCHÉOLOGIE

PAR FABRICE PAUL

La technologie de la modélisation tridimensionnelle offre une solution de relevés d'objets ou de bâtiments. Cette proposition faite aux chercheurs pour l'enregistrement et la compréhension de leurs données archéologiques représente également un accès facilité pour eux et pour les publics. Pour *L'Archéologue*, Fabrice Paul, avec sa société Edikom, détaille les procédures et bénéfices de la restitution et de la reconstitution en 3D.

Les 15 ans d'expérience dans le domaine de la valorisation scientifique par l'image numérique, nous permettent aujourd'hui d'entrevoir différents aspects et avantages de l'image 3D au service de l'archéologie. L'usage de ces images montre désormais qu'elles sont loin d'une simple fonction illustrative. Les principaux bénéfices de l'intégration de la numérisation, de la modélisation et de la visualisation 3D dans le domaine de l'archéologie sont illustrés ci-dessous. La valeur ajoutée ne se substitue pas aux autres techniques utilisées.

Pourquoi numériser en 3D ?

La numérisation 3D permet de capturer des détails précis d'artefacts et de sites archéologiques en créant des modèles volumétriques numériques de haute résolution. Ces doubles numériques garantissent d'une certaine manière la pérennité des objets mobiliers ou bâtis archéologiques : leurs caractéristiques structurelles et visuelles sont conservées pour les études futures ou pour faciliter d'éventuelles restaurations.

C'est particulièrement le cas des matériaux fragiles utilisés pour la construction, de la céramique, de certains mobiliers, etc. Outre l'aspect conservatoire de la numérisation 3D, il faut noter également l'aspect non invasif de cette dernière sur les sites archéologiques notamment. Même si elle oblige naturellement à une intervention sur place, elle réduit potentiellement la nécessité d'interventions physiques fréquentes. Plus encore, et je crois qu'il s'agit là d'un apport crucial, il est possible de numériser les différentes couches stratigraphiques d'une fouille et de garder une trace numérique et tridimensionnelle de chaque étape de cette dernière. Il peut donc exister plusieurs numérisations 3D d'un même site incluant l'emplacement exact de chaque mobilier archéologique trouvé sur place et la configuration spécifique des structures par période. Nous sommes amenés pour ces acquisitions numériques à utiliser différentes technologies d'acquisition : lasergrammétrie, photogrammétrie, lumière

structurée, infrarouge, LIDAR (Light Detection and Ranging), le choix de ces technologies va dépendre en général de l'environnement autour de l'objet traité, les dimensions de ce dernier, la précision attendue, les conditions d'accès ou de la lumière ambiante. Ces données précieuses ainsi collectées et sécurisées viennent grossir le corpus scientifique habituellement adossé aux objets ou aux sites archéologiques étudiés. Encore faut-il s'assurer que les conditions de pérennité de ces données soient anticipées.

La dématérialisation rend accessible ces découvertes, c'est là un autre avantage de cette technologie, à un nombre illimité de chercheurs, élargissant ainsi le champ des possibilités d'étude et de collaboration avec l'opportunité de manipuler ces copies numériques sous tous ces angles, zoomer sur certaines parties et y appliquer des traitements spécifiques pour en faire ressortir des détails comme le modèle numérique d'élevation qui, soumis à différents traitements d'image (couleur, luminosité...), va faire ressortir certains détails qui ne seraient pas forcément visibles à l'œil nu. Cela représente clairement un complément précieux aux supports habituellement fournis (photos, relevés...).

Par exemple, les vestiges de ce qui est communément appelé « mausolée de Lumone », en bordure de la via Julia Augusta, dans les Alpes-Maritimes, illustre ce propos. La numérisation 3D par photogrammétrie a permis la conservation d'un double virtuel du monument pour figer au moins virtuellement son état et va rendre possible la transmission à distance de ses volumes et ses textures à des spécialistes qui pourront l'examiner sous tous les angles.

La numérisation 3D en s'appuyant sur des volumes existants parfois très lacunaires, permet d'échanger avec les archéologues sur les possibilités de restitution et donc de tenter des propositions de compléments. L'outil numérique permet d'obtenir d'un objet partiel son aspect initial.



Un autre exemple de complémentarité du traitement tridimensionnel d'un objet archéologique est celui d'un moule de lampe à huile romain à Pompéi que nous avons numérisé et qui grâce aux outils 3D à notre disposition a pu être rempli virtuellement afin d'obtenir une réplique de la lampe qui était produite à l'époque avec ce moule. Enfin concernant le traitement des textures de mobilier ou des éléments de construction, la captation numérique 3D, notamment avec la photogrammétrie, va nous aider à acquérir assez facilement fidèlement la texture exacte d'un objet ou d'une structure bâtie, cela va considérablement simplifier le travail ultérieur et accroître le réalisme des volumes produits dans le cadre de la modélisation 3D qui souvent va venir en complément.

La modélisation 3D

Elle peut prendre deux aspects différents bien qu'assez proche visuellement, il s'agit d'une part des restitutions et d'autre part des reconstitutions 3D. Même si l'interprétation de ces deux

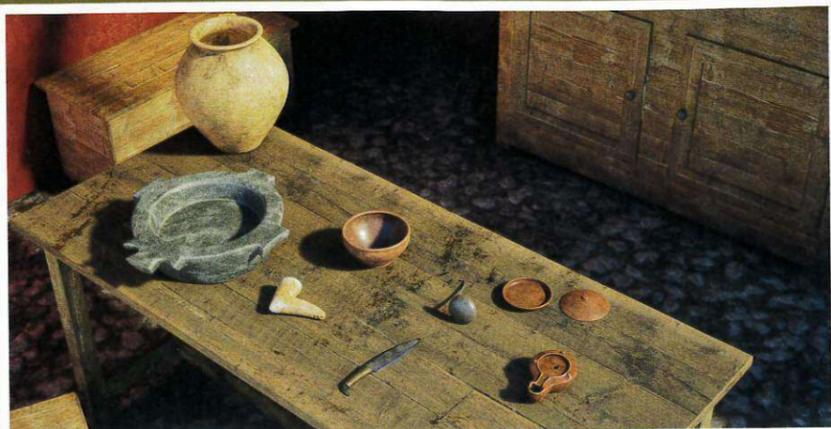
L'état actuel du mausolée de Lumone, à Roquebrune-Cap-Martin (Alpes-Maritimes) et une proposition de restitution 3D. Quelques fragiles fragments d'enduit peints dans les trois niches en façade sont désormais numériquement conservés.



Originaux et propositions de restitution des chapiteaux issus des fouilles archéologiques de la domus au péristyle rhodien ainsi que la domus à la Talève sultane d'Aix-en-Provence.

Ci-dessous, ce four de potier a pu être restitué sur la base d'une numérisation 3D de la fouille d'un atelier de potier à Pompéi.
©Edikom/CNRS/CCJ/AMU/Pierre Poveda/Parc archéologique de Pompéi.





Restitution de mobiliers archéologiques trouvés lors de fouilles à Digne-les-Bains (Alpes-de-Haute-Provence). Les aspects de la vie quotidienne sont évoqués à travers ces objets. © Edikom/Digne-les-Bains/Département 04.

Ci-dessous, deux traitements de l'abbaye romane de La Celle (Var) montrent les choix graphiques qui ont été faits en fonction de l'état des connaissances des études archéologiques. Les bâtiments dont seule l'emprise est connue apparaissent non texturés. L'illustration du bas montre la qualité graphique de la restitution du cloître de l'abbaye de La Celle.

© Edikom/Département du Var/Abbaye de La Celle.



« Les conditions de pérennité des données numériques sont un enjeu essentiel : des copies régulières sont archivées avec des conversions pour éviter des formats devenus obsolètes. »
- F. Paul.

Les interprétations et hypothèses fondées sur ce corpus scientifique solide, vont nourrir la construction de la restitution 3D jusqu'à arriver à un résultat scientifiquement acceptable. Parfois incomplet, il peut être amené à évoluer à la faveur de nouvelles découvertes ou analyses. Pour la restitution 3D, seules les parties connues et étudiées vont être traitées. Les zones d'ombre qui subsistent ne seront pas traitées.

Il faut néanmoins être conscient que dans le domaine de la restitution 3D, l'interprétation et l'arbitrage restent présents étant donné le côté généralement parcellaire des découvertes. Cela doit cependant rester marginal et être le fruit d'un argumentaire parfaitement documenté. Les zones concernées doivent être clairement indiquées par un traitement visuel différent comme une transparence, une teinte particulière ou une absence de texture réaliste.

Ainsi, cette approche progressive de restitution 3D s'avère être un outil efficace au service de la réflexion scientifique. La nécessité d'avoir à projeter dans un espace tridimensionnel, un ensemble de connaissances acquises lors de fouilles implique de poser des questions qui n'étaient pas forcément apparues lors des premières études. Ces questionnements naissent souvent lors des premières soumissions d'ébauches 3D, la transposition en volume va représenter une forme de matérialité qui même si nous restons dans le virtuel va faciliter l'appropriation de l'hypothèse tout en la mettant à l'épreuve du regard critique du scientifique et d'une certaine réalité et faisabilité. En cela ce travail de restitution devient de plus en plus une étape importante dans le processus d'analyse des découvertes archéologiques et de validation des hypothèses qui devrait pouvoir systématiquement faire partie intégrante du processus de recherche lorsque cet exercice s'y prête bien entendu.

La reconstitution 3D

La reconstitution 3D est une démarche qui va se révéler plutôt de l'ordre de l'évocation des objets ou des bâtiments retrouvés du fait de l'aspect plus lacunaire des données archéologiques qui ont pu être collectées. Certains états de conservation de vestiges ne vont permettre qu'une représentation hypothétique reposant tout de même sur une certaine réalité physique que les fouilles ont pu mettre en avant. Des arases de mur, des départs de voûtes, des fragments de colonnes, de chapiteaux ou de mobilier vont être autant de bases de travail pour tenter de proposer des représentations.

L'objectif dans ce cas va être de rendre compte d'un aspect général, d'une évocation, d'un environnement particulier ou d'un contexte dans une optique plutôt pédagogique de vulgarisation à destination du grand public. Le travail impliquera donc une grande part de supposition, en s'appuyant d'une part sur les éléments connus de la fouille et d'autre part sur les connaissances générales en rapport avec le sujet traité, son contexte géographique et historique. Par rapprochement typologique, la reconstitution complète d'un casque de Minerve trouvé lors d'une fouille archéologique à Fréjus a pu être proposée. Fortement dégradé mais présentant des marques évidentes d'ornements, il reste forcément dans ce cas une part d'interprétation.

D'une usine d'amphores découverte en Croatie, il ne restait que les bases de grands fours, de vastes espaces clos attenants et d'une structure périphérique clôturant l'ensemble. Ici, l'aspect fonctionnel des fours à amphores de type quasi industriel, leur emprise au sol, les contraintes de production d'une telle quantité d'amphores, l'épaisseur des murs et la mise en perspective avec des structures similaires comme des briqueteries et des tuileries modernes, ont permis de soumettre à un collège de spécialistes plusieurs hypothèses qui au fil des échanges et réflexions se sont affinées pour proposer non

pas une restitution, mais une reconstitution 3D, évocation de ce que pouvait être cet établissement. Puisque les amphores contenaient principalement de l'huile, un environnement de production oléicole a été proposé, en s'appuyant sur des descriptions et l'iconographie.

Ce type de reconstitution 3D a plusieurs objectifs, dont le premier est pédagogique. Ces restitutions n'ont pas la prétention d'être une représentation exacte de ce qui a été, mais un état des réflexions scientifiques soumis aux échanges, critiques et remises en cause.

Les avantages de la 3D

L'outil numérique permet en outre de multiplier les hypothèses à partir d'une même base et de manipuler les détails plus facilement. Les mises en scène réalistes facilitent la réflexion quant aux aspects fonctionnels du bâti, contraintes inhérentes à l'activité, ici l'évacuation de la fumée, la protection des fours aux intempéries, nécessité d'avoir de grands espaces de stockage à proximité ou encore de faciliter l'accès à la mer pour le transport. En outre, la 3D confère une grande souplesse pour les modifications ou corrections à apporter ultérieurement contrairement aux maquettes et permet d'aborder tous les aspects du bâti contrairement à des représentations illustrées en 2D.

Il est ainsi possible comme dans le cas d'un bateau de halage trouvé aux abords de Narbonne et étudié par le Drassm, de tester la quantité d'amphores qu'il pouvait contenir en s'appuyant à la fois sur la forme des composants structurels de l'épave, déformés par le temps et dont les scientifiques ont pu proposer un redressement pour en déduire la forme initiale, ainsi que sur les typologies et proportions des amphores trouvées sur place.

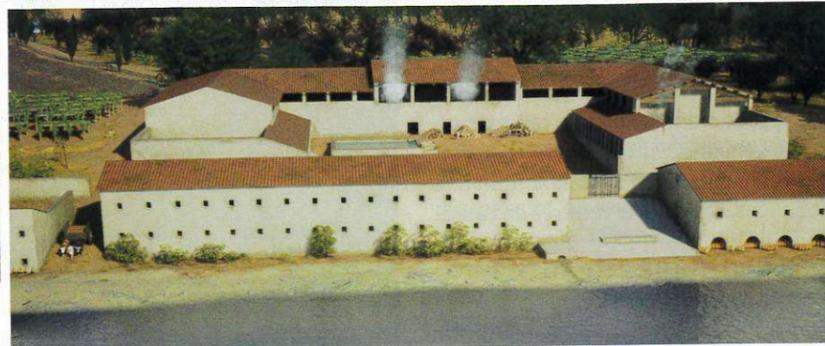
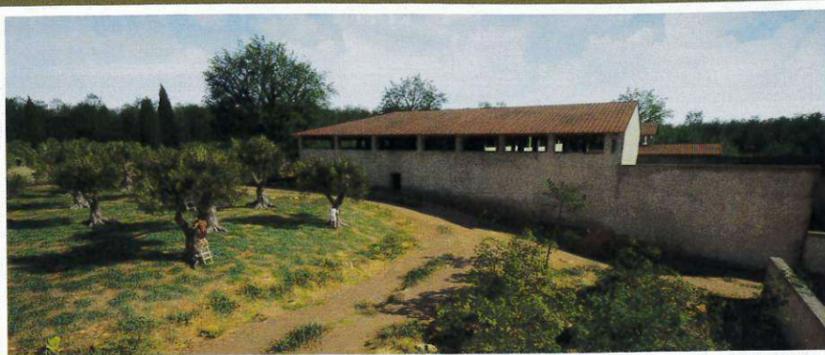
Une proposition de reconstitution d'un moulin hydraulique romain a été effectuée d'après les vestiges découverts lors d'une fouille préventive par le service archéologique de Fréjus, dont une meule, et les études très complètes sur



Fragment d'une statue de Minerve trouvée à Fréjus. Ce fragment du casque de la déesse a été intégré dans la proposition de restitution 3D (en haut). Ci-contre, proposition de restitution 3D complète du buste de Minerve. © Edikom/Ville de Fréjus.

« Et l'avenir ? Le développement de la simulation 3D grâce à l'intelligence artificielle permettra de traiter, comparer et croiser un grand nombre de données pour optimiser les traitements et examiner efficacement la compatibilité géométrique de certains fragments. Ce sera un gain de temps immense pour les chercheurs. »

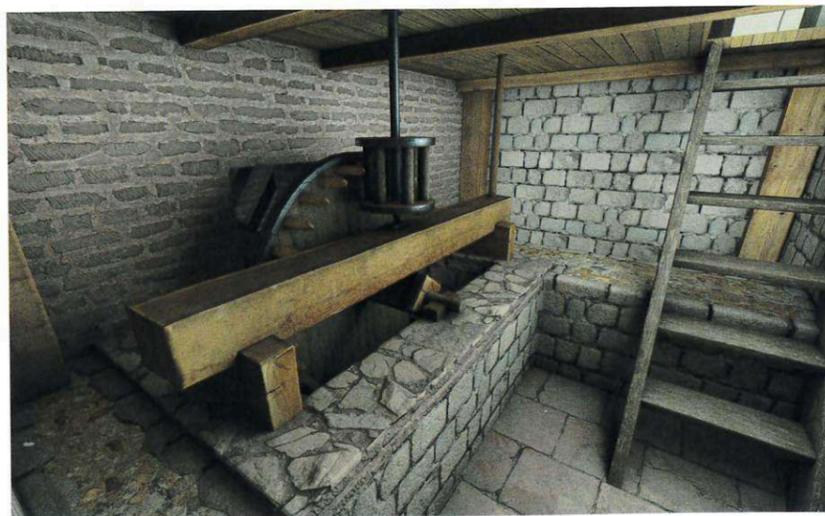
- F. Paul



Ci-dessus, deux propositions de reconstitution d'une fabrique d'amphores romaines à Loron, en Croatie. Il s'agit de documents de travail, d'aides à la réflexion dans le cadre d'une étude archéologique en cours. © Edikom/CNRS/CCJ/AMU.

Dessous, vue de la salle à engrenages du moulin hydraulique romain découvert à Fréjus. Les mesures de la meule trouvée en fouille donnent des indications sur la vitesse optimale de rotation. La fosse à engrenage et la position de l'axe de rotation (définies par l'archéologie) vont donner des indications sur la forme du dispositif et sur la taille de la roue dentée. Ces mesures obtenues permettent de se projeter sur la nature de la roue : c'est bien une roue à augets (et non une roue à aubes) identifiée en raison d'une régularité de la rotation nécessaire et du constat d'une alimentation en eau par un canal d'amenée.

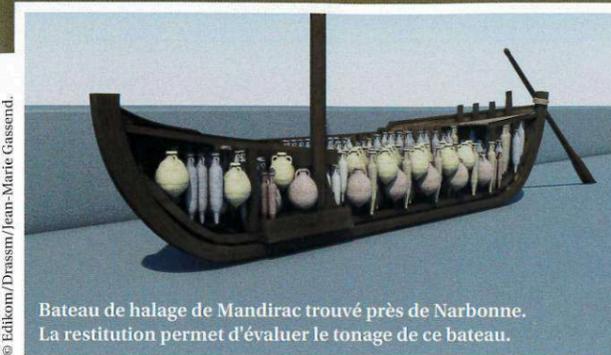
© Edikom/Ville de Fréjus.



l'attractivité du résultat, mais cette réalité oblige naturellement à une rigueur encore plus importante dans le traitement scientifique et le propos tenu lors de la transmission du résultat auprès du public, car ce réalisme obtenu risque de laisser à penser que ce qui est présenté est une exacte projection d'une réalité plus ancienne.

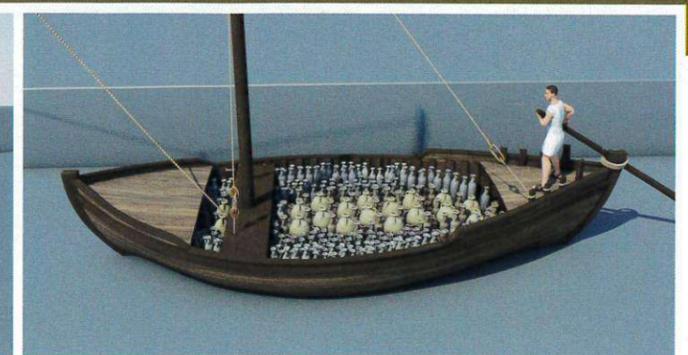
Au croisement des représentations et des usages

Il arrive assez souvent que la frontière entre restitution et reconstitution 3D se réduise pour donner un résultat à la croisée des chemins. Des vestiges archéologiques peuvent en effet proposer des zones propices à une représentation précise et fondée sur des données factuelles qui vont faire l'objet d'un faible niveau d'interprétation et d'autres zones plus soumises à l'hypothèse. Il peut alors être utile d'effectuer un mixte des deux solutions afin de ménager l'aspect scientifique tout en autorisant une diffusion auprès du grand public, mais aussi pour sensibiliser à l'importance d'un site archéologique, pour en développer l'étude ou renforcer sa protection par exemple. Nous avons dernièrement produit pour le compte de la Ville d'Aix-en-Provence et son office du tourisme des visites virtuelles de deux maisons romaines situées au centre de la ville antique et dont la représentation est le résultat d'un important travail d'étude de la part des archéologues et autres spécialistes (des mosaïques, des enduits peints, etc.). Tout ce qui est montré de manière réaliste est soit le fruit d'une interprétation rigoureuse des données archéologiques trouvées sur place, les zones les moins connues ont subi un traitement différent : par exemple, lorsqu'un enduit peint n'est pas parfaitement connu, une scène montrant la production d'une épure sur les murs a été reproduite. Les jardins, inspirés de l'art topiaire romain, ont été ajoutés pour évoquer l'ambiance et l'art de vivre dans ces demeures. Ces



© Edikom/Drassm/Jean-Marie Gassend.

Bateau de halage de Mandirac trouvé près de Narbonne. La restitution permet d'évaluer le tonnage de ce bateau.



productions d'images tridimensionnelles vont ensuite prendre la forme de simples vidéos d'animations 3D, d'animations pédagogiques ou de visites virtuelles allant de l'immersion dans les espaces restitués ou reconstitués ou d'accéder à des expositions ou des musées virtuels.

La souplesse d'utilisation de ses outils présente un aspect attractif pour la valorisation du travail des archéologues et aussi va ouvrir le champ de la diffusion de ces supports au-delà des espaces traditionnels (musée, expositions...), autorisant des approches plus « hors les murs » en allant vers les utilisateurs soit par le biais de panneaux d'interprétation connectés, des visites virtuelles dans des lieux divers. Enfin l'attractivité de ces outils pour tous les publics pouvant offrir des expériences sensorielles plus stimulantes, accroît l'appropriation et la mémorisation des connaissances transmises, en tout cas c'est ce que nous avons pu remarquer tout au long de ces années de pratique. ■



© Edikom/Pierre Vallauri/Ville d'Aix-en-Provence.

Ci-dessus, cette vue 3D de la *domus au péristyle rhodien* d'Aix-en-Provence montre la prudence nécessaire : sans données archéologiques suffisantes, le traitement des surfaces est laissé blanc.

Ci-contre, restitution 3D de la *domus au péristyle rhodien* d'Aix-en-Provence. © Edikom/Ville d'Aix-en-Provence.



Ci-dessous, ces deux restitutions de la *domus à la Talève sultane* d'Aix-en-Provence évoquent de manière documentée l'esprit d'un jardin à la romaine en Gaule narbonnaise.



© Edikom/Jérémie Terris/Ville d'Aix-en-Provence.



LA LASERGRAMMÉTRIE et les modèles 3D en archéologie

PAR MARC PANNEAU

Les illustrations qui accompagnent cet article ont été réalisées dans le cadre des travaux de thèse de doctorat de l'auteur sur le théâtre antique d'Orange pour le projet TAIC porté par Sandrine Borel-Dubourg, ingénieure de recherche en archéologie, docteure en architecture (CNRS, Aix-Marseille univ, IRAA, Aix-en-Provence). Le projet TAIC est un projet soutenu par la fondation A*Midex (Aix-Marseille université).

Ci-dessus : Traitement par nuage de points de la façade du théâtre d'Orange.
© M. Panneau, IRAA / A-BIME.

Pour approfondir le sujet :

MURPHY (M.), MCGOVERN (E.), PAVIA (S.), «Historic Building Information Modeling-Adding Intelligence to Laser and Image Based Surveys», *The Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, vol. 38-5, 2012, p. 1-7.

La lasergrammétrie, avec le scanner 3D ou scanner à laser terrestre (TLS), ne cesse de se perfectionner pour l'acquisition des données. Marc Panneau, bon pédagogue, nous explique le fonctionnement de cette technologie et son évolution. Mais en fait, à quoi sert de scanner nos monuments ?

Le modèle 3D n'est pas une réalité, et aussi sophistiqué soit-il, il ne saurait être confondu avec celle qu'il prétend représenter. Cette mise en garde s'inspire de la fameuse formule des historiens H. Le Bras et E. Todd : « *La carte n'est pas une réalité* » (*L'invention de la France : atlas anthropologique et politique*, 1881). Elle souligne la nécessité impérieuse de garder à l'esprit que toute modélisation résulte d'un processus complexe impliquant sélection, interprétation et, parfois, altération - délibérée ou non - de la réalité observée. Cette considération revêt une importance éminemment particulière dans le domaine de l'archéologie.

En effet, la modélisation tridimensionnelle, loin d'être une simple reproduction algorithmique, constitue une reconstruction intellectuelle influencée par les choix méthodologiques, les limites technologiques et les interprétations des équipes de recherche. Reconnaître ces limites ne diminue en rien la valeur de ces processus ; au contraire, cela encourage une approche plus critique et nuancée de leur utilisation et

de l'interprétation des données qu'ils génèrent.

La forte présence des modèles 3D en archéologie témoigne des besoins scientifiques, mais aussi des limites des outils traditionnels pour l'acquisition des données et la représentation des objets d'étude (l'environnement, la topographie, l'architecture, les vestiges matériels et immatériels...). Rares sont aujourd'hui les secteurs de la recherche qui ne sont pas tributaires d'informations générées, directement ou indirectement, par des procédés d'acquisition tridimensionnelle, l'architecture et l'archéologie du bâti en premier lieu. Mais il est vrai que la diversité des contextes d'application - tant dans le domaine de l'archéologie préventive que dans celui de l'archéologie programmée - ainsi que la variété des approches méthodologiques adoptées, témoignent également de l'adaptabilité de ces technologies à la pratique scientifique.

L'évolution des technologies 3D au cours des deux dernières décennies a également suscité un débat sur les impacts - bien plus complémentaires

que révolutionnaires - des habitudes de travail, mettant en lumière la transformation profonde des pratiques et perceptions archéologiques, tout en soulevant des questions cruciales sur l'utilisation, la fiabilité et l'exploitation des données 3D dans l'étude de l'architecture notamment.

Depuis quand fait-on de l'acquisition 3D en archéologie ?

Dans le domaine de l'archéologie, les pratiques d'acquisition sont évidemment passées aux technologies numériques en trois dimensions dès qu'elles l'ont permis. Mais il semble important de rappeler en préambule qu'il est tout aussi évident que les archéologues n'ont pas attendu le numérique pour travailler en trois dimensions, et sans nous étendre sur les outils de topométrie* antiques, rappelons également que le levé et l'implantation topographique dans un environnement en relief (tridimensionnel donc) étaient déjà possibles durant l'Antiquité grâce à l'usage de la *groma*.

Les méthodes d'acquisition, à l'instar des évolutions de l'informatique

depuis la seconde moitié du xx^e siècle, ont évolué au fil des avancées technologiques. Les premiers instruments d'acquisition numérique sont les outils de topographie utilisés sur les chantiers de fouilles, le tachéomètre en particulier. Il permet d'enregistrer les coordonnées spatiales d'un point en 3 dimensions, par une acquisition point par point d'un angle de mur, d'un sol, d'un bord de fosse, etc. La croissance des chantiers d'archéologie préventive après les années 2000 a contribué au développement des outils dédiés à l'enregistrement spatial exhaustif. Le caractère intrinsèquement destructif de la fouille a contraint les archéologues à s'orienter vers des techniques d'acquisition les plus performantes possibles. La lasergrammétrie, avec le scanner 3D, marque une véritable rupture dans les levés topographiques avec la possibilité d'enregistrer un environnement large à haute résolution.

Le scanner 3D, également appelé laser terrestre (TLS), partage avec le laser aéroporté la technologie du Lidar (Light Detection And Ranging). Cette technologie repose sur les propriétés de réflectance des surfaces, c'est-à-dire

LA LASERGRAMMÉTRIE



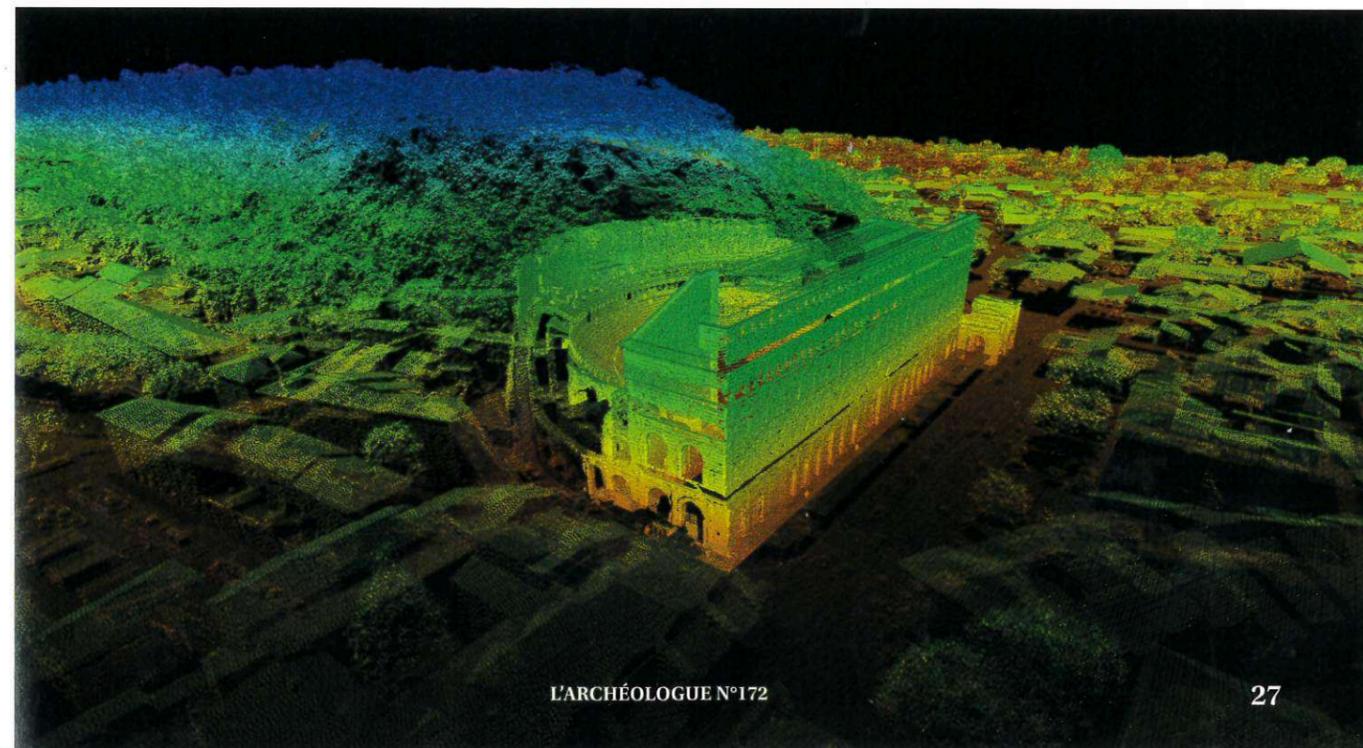
Restitution de la *groma* de Verus (Naples).

© Restitution de M. Fincker, J.-M. Labarthe et V. Picard, « La Groma, le théâtre et l'archéologue », E. Boube et al. (dir.), *De Rome à Lugdunum des Convènes*, Ausonius, 2014.

Topométrie : Ensemble des opérations effectuées, principalement sur le terrain, pour la détermination métrique des éléments d'une carte (Larousse).

Assemblage de nuages de points issus de la technologie du Lidar avec une colorisation par niveaux altimétriques. (Lidar terrestre du théâtre d'Orange et couverture Lidar-HD aéroportée de la ville d'Orange par l'IGN).

© M. Panneau, IRAA / A-BIME.



leur capacité à renvoyer la lumière émise par l'instrument. On le voit à travers ces exemples la place prépondérante de la lumière et plus particulièrement de la photométrie, la mesure par la lumière, dans le domaine de l'imagerie 3D.

En France, la première exploitation d'outils lasergrammétriques est portée par la société Mensi qui, dès la fin des années 1980, développe des technologies adaptées et propose le premier laser scanner, Soisic, en 1992. Il est doté d'une technologie laser par triangulation plane et il est capable d'émettre une centaine d'impulsions par seconde jusqu'à 40 m de distance. La première utilisation de ce scanner en archéologie est réalisée dans le cadre des travaux de numérisation de la grotte Cosquer de Marseille, une première mondiale en 1994. Son autonomie, sa polyvalence et son faible encombrement le rendent particulièrement adapté aux relevés d'architecture en France et sur les sites des Écoles Françaises de l'étranger (Rome, Delphes...).

De l'outil au traitement des données

Les instruments disposent aujourd'hui de capacités avancées en matière de densité de points capturés, de volume couvert et de portée de mesure, avec une justesse et une fidélité millimétrique même à grande distance. Ces caractéristiques rendent possible la numérisation complète et détaillée d'un environnement ou d'un édifice, à des hauteurs ou dans des espaces difficilement accessibles. Les différentes technologies d'acquisitions dont sont équipés ces scanners (la triangulation plane ayant été délaissée au profit de la mesure par temps de vol ou par décalage de phase) permettent désormais de lancer plus de 2 millions de points par seconde sur des scènes à 360° et à plus de 100 m de distance. Les scanners sont aussi dotés de capteurs photographiques à haute définition qui permettent, lorsque cela est possible, l'enregistrement colorimétrique. Les traitements numériques permettent d'obtenir des nuages très denses de plusieurs dizaines voire de plusieurs centaines de millions de points texturés, c'est-à-dire colorisés par les données photographiques.

Le scanner ne peut « éclairer » que ce qu'il « voit » directement. Lorsque l'on regarde autour de soi, et suivant l'encombrement de l'environnement, il est généralement impossible de voir la totalité des surfaces qui nous entourent. Il faut déplacer l'instrument autant de fois qu'il est nécessaire pour couvrir une zone d'étude (fouille sédimentaire, monument, environnement géologique...), parfois jusqu'à plusieurs centaines de stations d'enregistrement. La première précaution est de calculer le cheminement des positions des stations afin de conserver un certain niveau de recouvrement entre chaque nuage, maintenir un niveau de visibilité des points de référence et maximiser les surfaces de couvertures de chaque zone scannée.

Lors de l'acquisition, un laser est

projeté dans un miroir rotatif situé au centre de l'instrument. Il rayonne autour de l'appareil en formant un cercle, balayant verticalement l'environnement de manière synchronisée avec les rotations horizontales de la machine jusqu'à enregistrer la scène complète. Durant la demi-rotation de l'instrument (le balayage laser se fait des deux côtés à la fois), l'ordinateur de bord enregistre la position de chaque point dans l'espace (angles et distance) et sa valeur de réflectance.

Si les conditions le permettent et si cela est nécessaire, parallèlement ou immédiatement après cet enregistrement laser, une acquisition photographique est possible. À l'aide d'une seconde rotation, un lot de plusieurs centaines de photos ou une photo à 360° permet la captation chromatique de la scène (voir l'illustration page suivante).

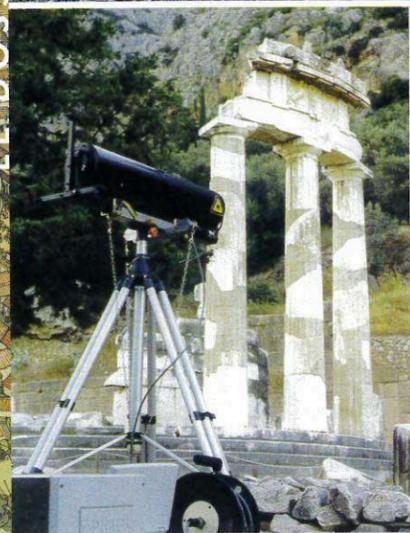
La rapidité de mise en place des phases d'acquisition constitue un des atouts de cette méthode. Néanmoins, le traitement ultérieur des données requiert davantage de temps et nécessite un équipement informatique spécifique. Lors du post-traitement, la colorisation des points, l'unification des stations en un seul nuage et son géoréférencement dans un espace en coordonnées géographiques sont des étapes indispensables au bon usage des nuages (voir l'illustration page suivante).

Quels sont les usages ?

Le relevé de structures en place est la phase préalable à l'étude archéologique, il se fonde sur l'observation, la description et le dessin géométral qui demeure un document incontournable dans l'enregistrement. L'acquisition 3D fournit, pour sa part, le moyen

Extrait d'un assemblage de nuages de points de l'escalier occidental du théâtre antique d'Orange. Il s'agit d'une vue en transparence des volumes sans colorisation par la photo.

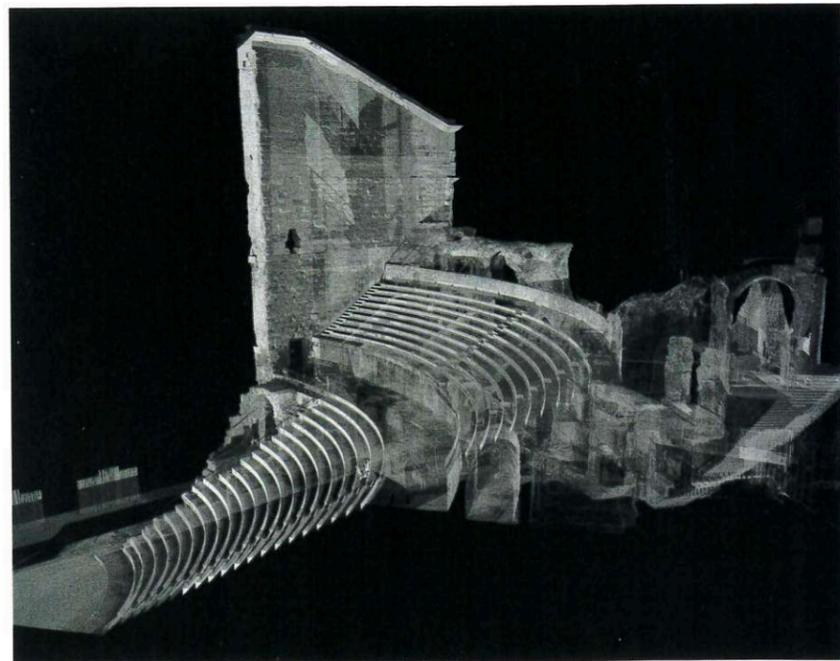
© M. Panneau, IRAA / A-BIME



Campagne d'acquisition avec le scanner Soisic sur la terrasse de Marmaria devant la tholos du sanctuaire d'Athéna de Delphes.

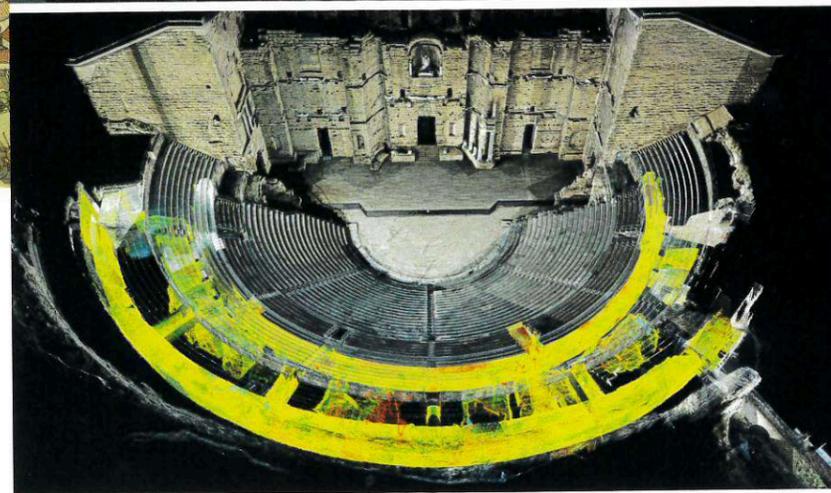
© Bommelaer et al. 1997.

Extrait d'un assemblage de nuages de points bruts de la partie orientale du théâtre antique d'Orange. © M. Panneau, IRAA / A-BIME





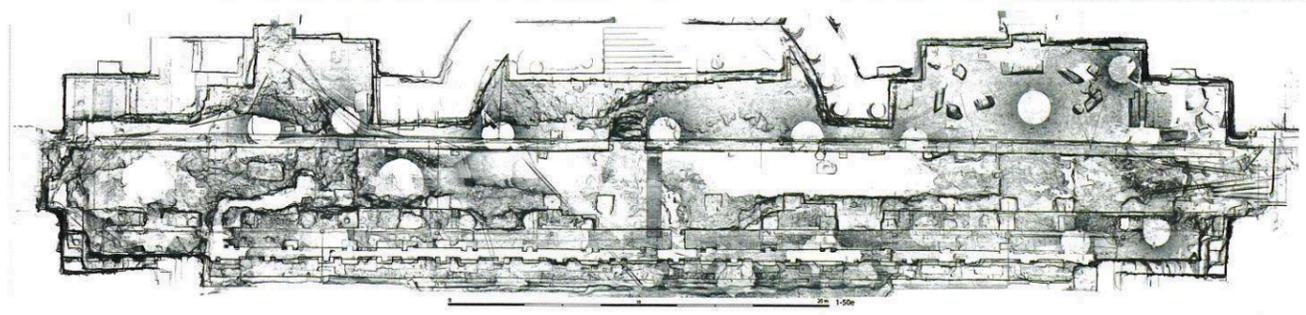
Extrait d'un assemblage de nuages de points du théâtre avec la colorisation des points à partir des photos. © M. Panneau, IRAA / A-BIME



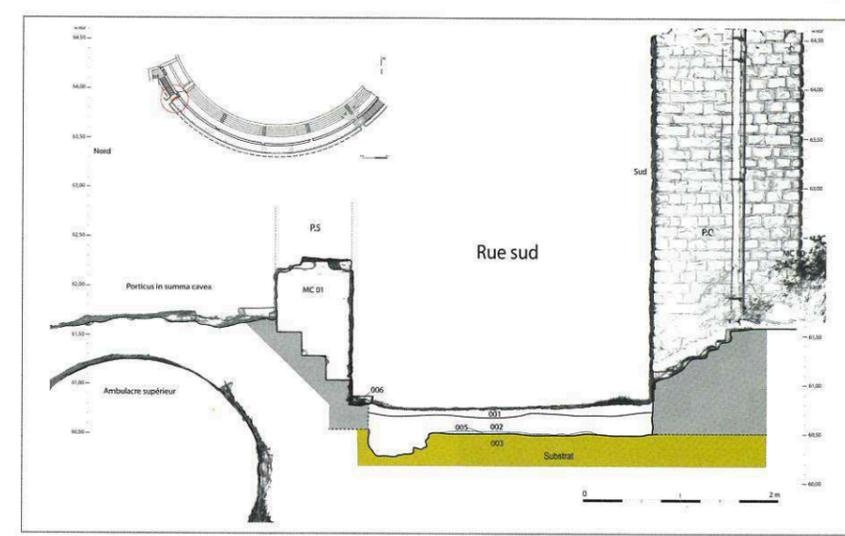
Extrait d'un assemblage de nuages de points du théâtre mixant à la fois des données colorisées et des espaces non colorisés par la photo, mais représentés avec une couleur correspondant au facteur de réflexion. © M. Panneau, IRAA / A-BIME

Ortho-image d'élévation de la partie orientale du mur de scène.

© M. Panneau, IRAA / A-BIME



Ci-dessus, ortho-image en plan de l'espace sous la scène actuelle (*hyposcaenium*). Espace très accidenté et peu praticable, le levé laser fournit une vue en plan et un support aux relevés manuels. © M. Panneau, IRAA / A-BIME



Coupe archéologique de la fouille des niveaux de la rue située à l'arrière du théâtre s'appuyant sur un profil extrait du nuage de point mettant en relation les données de la rue, de l'ima cavea et de l'ambulacre supérieur.

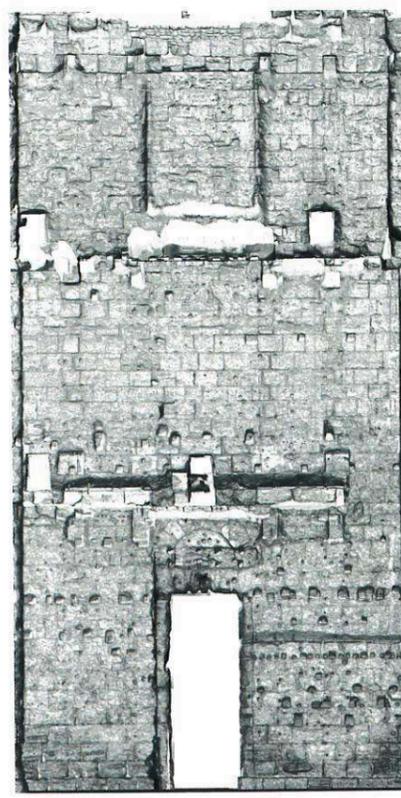
© M. Panneau, IRAA / A-BIME

le plus efficace de produire des représentations en 2D, mais elle ne doit pas se faire au détriment de l'enregistrement classique. Les résultats de la lasergrammétrie permettent de générer des ortho-images, des coupes et des profils formant des supports en haute définition pour le relevé, à l'échelle et géoréférencés, adaptés aux conditions et aux délais de phases de terrain. Cette méthode permet le relevé de surfaces (en plan ou en élévation) de grandes dimensions, par plusieurs équipes et dans un temps relativement court, tout en réduisant les erreurs géométriques et le temps technique (consacré au calage de repères et d'axes pour le dessin, à la prise de points au fil à plomb, à la superposition des relevés, etc.) et en maximisant le temps analytique et descriptif.

Dans cette logique bidimensionnelle, les logiciels de traitement spécialisés permettent aussi la sélection et l'extraction spécifique de portions du

nuage de points. Ces exports facilitent la génération de supports cartographiques et de plans topographiques en s'appuyant sur les vues cumulées. Ces documents sont indispensables, tant comme outils de travail que comme supports de publication.

L'acquisition 3D offre également une capture détaillée et précise d'un environnement à un instant donné, servant de référence pour la recherche et la conservation. Sans être une copie parfaite de la réalité, car les conditions d'acquisitions (accessibilité, avant ou après travaux) ou les paramètres d'enregistrement (lumière naturelle ou artificielle, technologie utilisée...) altèrent la captation exhaustive, elle fournit un archivage numérique du site. L'adoption de formats de stockages interopérables et primaires, par opposition aux formats propriétaires, est essentielle pour assurer la pérennité des données, indépendamment de l'évolution des technologies et des logiciels.



La modélisation des données de l'architecture en archéologie

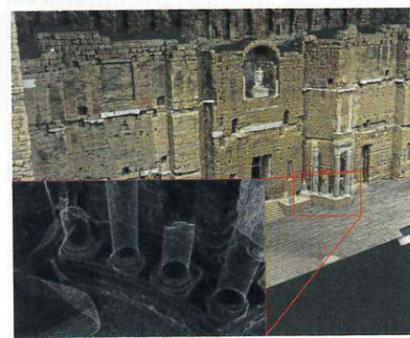
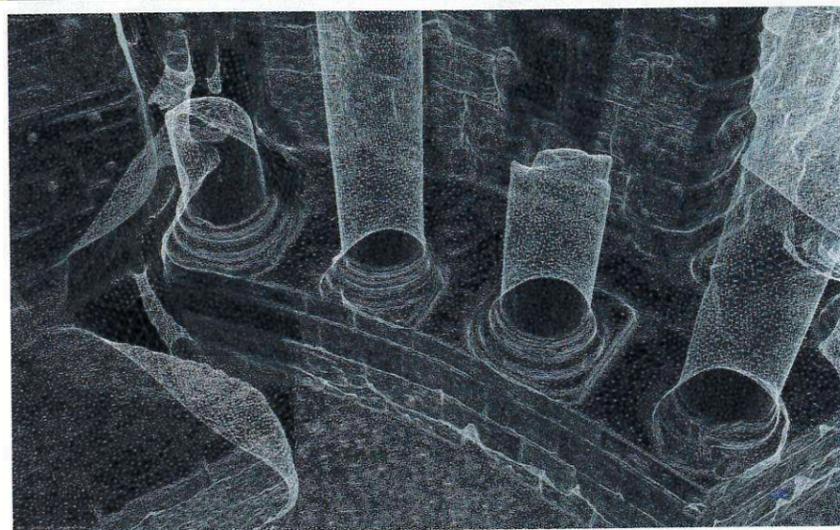
Le guide sur le vocabulaire de la 3D du consortium 3DHN du CNRS définit un modèle numérique comme un ensemble de données numériques liées à un unique objet d'étude et obtenues après acquisition ou modélisation, « il est une synthèse numérique destinée à évoluer avec l'état des connaissances de la recherche. » On le comprend ici, l'acquisition d'un nuage de points n'est qu'une étape dans la modélisation. On voudrait donner à la 3D l'objectif de rendre simple ce qui est complexe et visible ce qui ne l'est pas ou ce qui ne l'est plus. Si cela peut y contribuer, la troisième dimension seule ne peut suffire à la compréhension archéologique d'un monument, elle doit être enrichie des informations recueillies lors des études. Pour qu'il y ait un modèle, il faut donc lui adjoindre des données

et plus particulièrement de la donnée archéologique dans notre cas.

La conversion du nuage de points en représentations géométriques simplifiées, qu'elles soient facettées ou solides, peut s'effectuer de manière automatisée, semi-automatisée ou manuelle. Le produit résultant de cette opération de transformation, caractérisé par une réduction de la complexité de calcul et par une facilité de manipulation, est désigné sous le terme de modèle numérique. Il existe différents processus et méthodes de modélisations, qui s'appuient sur le nuage de points.

L'une des méthodes les plus courantes est la construction d'un maillage. Il s'agit d'une méthode algorithmique de reconnaissance des surfaces et des volumes par la création de sommets, d'arêtes et de faces. L'ensemble des points traités est ainsi transformé en une succession de facettes triangulaires plus ou moins denses suivant le type

de maillage défini. Ce maillage devient un modèle que l'on peut compléter et enrichir de nouvelles informations (textures, attributs, métadonnées...). Une autre modélisation privilégiée actuellement en architecture est la modélisation des données du bâtiment (BIM, Building Information Modeling), un processus basé sur la création d'objets 3D à partir du nuage de points et enrichie par les données du bâtiment (technique, mécanique, scientifique). Le processus BIM est employé depuis plus d'une quinzaine d'années dans le domaine de l'architecture contemporaine. Initialement développé pour les grands programmes immobiliers, il permet une meilleure planification de la construction et meilleure gestion du bâtiment, car bien plus qu'une simple représentation 3D, le BIM est le socle de la mémoire du bâti sur l'ensemble de son cycle de vie. Le modèle est une représentation graphique alimentée par les caractéristiques



Exemple de maillage 3D réalisé pour des tests de modélisation automatique à partir des nuages de points du mur de scène et détail la densité des mailles au pied des colonnes du podium oriental. © M. Panneau, IRAA / A-BIME

physiques et fonctionnelles du bâtiment qui est constitué des composantes géométriques et techniques des objets. La plasticité du processus permet aux archéologues de voir dans cette méthode, un moyen de gestion et d'étude d'un monument ou d'un site historique. Pour la question de l'archéologie de l'architecture, cette méthode est en cours de déploiement sur certains sites archéologiques en France (le théâtre antique d'Orange, le parc archéologique de Fourvière de Lyon) et à l'étranger (le temple d'Apolon de Delphes en Grèce, la chartreuse de Jerez en Espagne ou la *domus regia, sacraria martis et opis* de Rome en Italie). Dans le HBIM, méthode plus

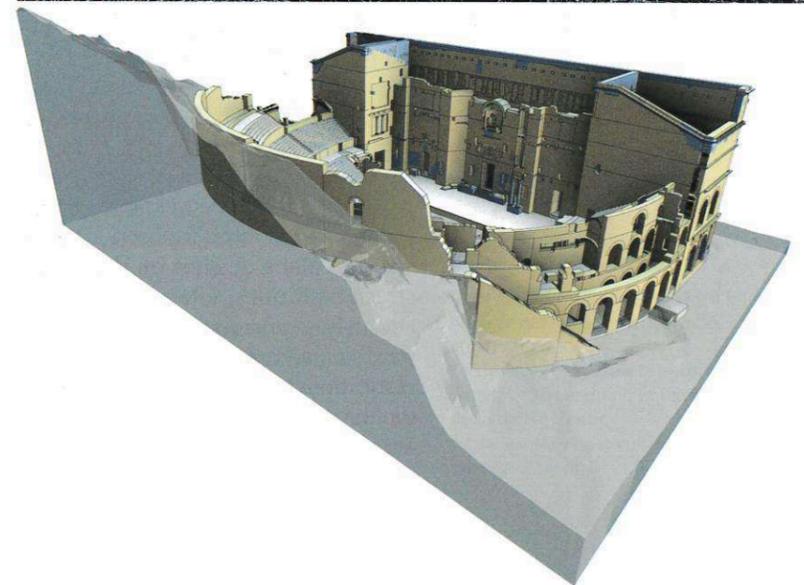
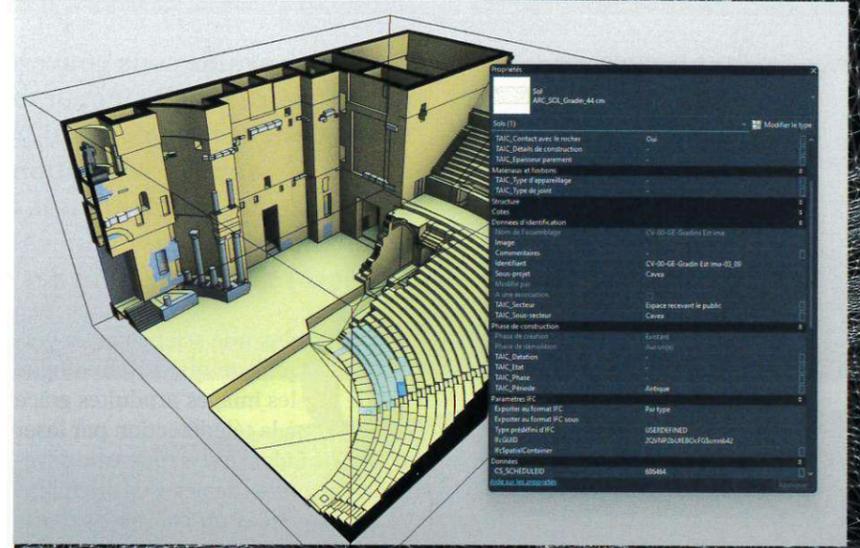
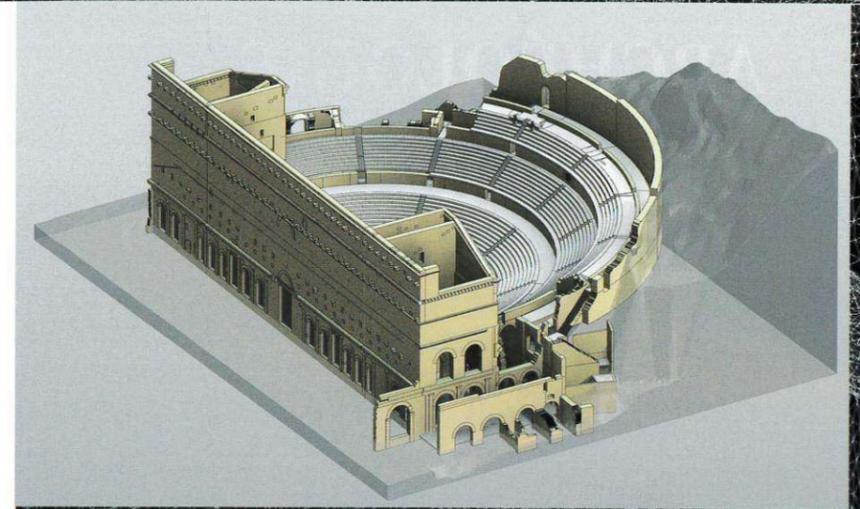
adaptée aux monuments historiques (Murphy, McGovern, Pavia 2012), les objets du bâtiment peuvent être comparés à des unités de constructions archéologiques.

La modélisation suit un processus qui conduit à la création d'une maquette « sémantisée », c'est-à-dire enrichie des données de la recherche. À partir des nuages de points et des observations de terrain (relevés, photos, données anciennes, etc.), chaque unité de construction est dessinée en 3D à l'aide d'un logiciel de modélisation. Les objets modélisés sont enrichis d'informations qui leur sont propres et régis par un ensemble d'interactions et de règles d'appartenance constructive. Cette logique est assez cohérente avec les méthodes d'enregistrement stratigraphique telles que nous les connaissons en archéologie, notamment « les lois de la stratigraphie » établies par E. C. Harris dans les années 1970, qui structurent toujours les méthodes de traitement et le raisonnement en archéologie. Dès sa conception à partir des années 2012, le HBIM adopte une démarche linéaire, la vie du bâtiment étant pris à l'instant de l'étude, à la différence du BIM qui sert tout au long du cycle de vie d'un bâtiment, du projet à sa destruction. Le modèle devient le support des informations actuelles et passées auxquelles des degrés de fiabilité sont attribués. C'est la qualité des données intégrées dans la modélisation — outre la précision géométrique — qui définit la viabilité des utilisations ultérieures de la maquette. Car par les possibilités d'ouvertures de son format et par la quantité d'attributs qu'elle contient, la maquette numérique est susceptible d'accompagner les futurs travaux scientifiques ou d'être utilisée par tous ceux qui travaillent sur le site ou le monument (État [DRAC], Maîtrise d'ouvrage, Maîtrise d'œuvre, etc.).

Numérisation volumétrique d'un monument porteuse d'une structuration des informations, la maquette numérique du bâtiment offre aux équipes de recherches un outil de

visualisation de l'espace d'étude, d'interrogation et de manipulation des données liées, mais également un support de simulation des hypothèses archéologiques et de restitution des connaissances et des informations. Cependant, il est crucial de reconnaître que la mise en œuvre d'un tel processus nécessite une approche progressive et modulaire, qui permet non seulement d'adapter l'outil aux besoins spécifiques de chaque projet de recherche, mais aussi d'incorporer les avancées technologiques à mesure qu'elles émergent et les nouvelles données.

Bien que les méthodes évoluent, du relevé manuel traditionnel à la vectorisation jusqu'à sa conversion en données géoréférencées pour les Systèmes d'Information Géographique et désormais en modèle numérique, le processus de modélisation et donc d'interprétation des données a toujours accompagné la « praxis » archéologique. ■



De haut en bas,
© IRAA - société A-BIME
Extrait de la maquette BIM du théâtre et de son environnement géologique proche.

Extrait de la maquette BIM du théâtre et vue des parties internes et exemple d'une fiche attributaire associée aux objets.

Extrait de la maquette BIM du théâtre et mise en couleur des blocs d'architectures liés aux restaurations contemporaines et de son implantation dans la colline.

PHOTOGRAMMÉTRIE : « HORS-SOL, IL N'Y A PLUS DE SENS »

LE NÉOPHYTE EST
PHILIPPE MATHIEU

L'INTERVIEWÉ EST
SYLVAIN RASSAT

Qu'est-ce que la photogrammétrie, quel est son avenir, quelles sont ses applications, quelles sont ses limites? Rencontre avec Sylvain Rassat, ingénieur de recherches en archéologie, rattaché à l'université de Lorraine. Il a bien voulu répondre à nos questions de néophyte.

Le néophyte: Sylvain Rassat bonjour, alors tout de suite, la photogrammétrie: définition!

Sylvain Rassat: Il s'agit de capturer la réalité en créant un modèle numérique, à partir de photographies.

J'ai beau être néophyte, je me suis quand même un petit peu renseigné, et d'après ce que j'ai vu, les débuts de la photogrammétrie ne datent pas d'hier.

La méthode en elle-même a presque un siècle et je vous dirai même que la méthode date du début du vivant. Chaque être vivant qui est doté de vision à au moins deux yeux ce qui permet de reconstituer les reliefs, les distances, ne serait-ce que par la stéréoscopie, la différence d'angles, d'emplacements de prises de vues sur un même objet. C'est notre système cognitif, notre cerveau qui recrée par rapport à cette distance, cette différence de captation pour un même objet, l'espace et les reliefs.

Cette technique existe donc depuis un peu plus d'un siècle mais précédemment il fallait le faire manuellement. Le principe même de cette technique c'est la corrélation par image dense; c'est reconnaître les points communs entre deux clichés sur un même objet, une même personne, sur un même lieu.

On fait donc superposer des points? Comment cela se passe-t-il exactement?

Non en fait, il faut vraiment retrouver les points communs entre plusieurs clichés sur un même objet et c'est cette différence, cette triangulation qui permet de recréer

l'espace. Je suis archéologue mais je suis aussi géomètre, topographe et une des règles d'or de la captation spatiale c'est l'utilisation de la triangulation. Thalès et Pythagore sont toujours à la mode.

Cette méthode qui jusqu'à récemment était faite de manière manuelle, avec la révolution numérique pour les ordinateurs mais aussi pour les appareils photos numériques, les capacités de restitution en trois dimensions ont été décuplées. On peut traiter des objets de manières beaucoup plus rapides mais aussi de manière plus « démocratique » puisque chacun d'entre nous a un smartphone doté de capteurs photos et vidéos de plus en plus performants et chacun d'entre nous a des capacités de captation photogrammétriques extrêmement importantes.

On ne peut pas ne pas penser à la photo stéréoscopique, ces systèmes en bois que l'on trouvait à la fin du XIX^e siècle. C'était quoi ce qui donnait cette impression de 3D?

Oui, c'était cette différence d'angle de vue, parfois assez fine, qui donnait cette impression de 3D sur un support plat. C'était le même principe de ces lunettes, pour ceux qui ont connu ça au cinéma avec ces lunettes rouge et bleu qui personnellement me rendaient malade au bout d'un quart d'heure.

Essayer de jouer au tennis, ou au foot, ou de conduire, ce que je vous déconseille, en vous masquant un œil, clairement la notion de profondeur et de relief ne sera plus disponible.

Est-ce que l'on recrée désormais un espace dans lequel on peut voyager?

Si vous avez fait une captation suffisamment dense vous pouvez naviguer dans cette scène. Ce peut être un objet, une personne, un monument... c'est infini. Il n'y a pas de limite et la force de la photogrammétrie c'est qu'elle est à la portée de chacun. C'est une force de frappe numérique quasiment instantanée et que l'on ne connaissait pas il y a encore une vingtaine d'années.

Si je veux faire de la photogrammétrie avec mon téléphone, quels conseils pourriez-vous donner?

D'abord bien réussir sa captation, avoir de bons réglages, une bonne exposition, évidemment de la netteté, pas d'éléments mobiles qui passent devant la scène, ça, c'est un peu le talon d'Achille de la photogrammétrie. Il faut aussi que l'objet soit bien « recouvert » pour que les points puissent correspondre. Ensuite peu importe le traitement numérique ce qui est important c'est le soin apporté à la captation et le respect de ces règles d'or.

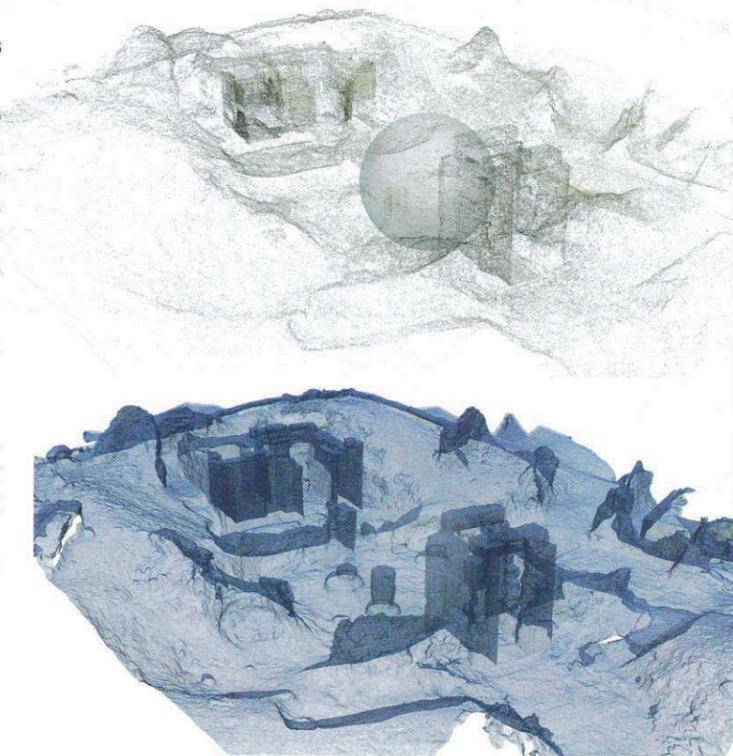
C'est une méthode que j'aime beaucoup en tant qu'archéologue parce que c'est une méthode tout terrain. On travaille avec un reflex, c'est très léger. Ce n'est pas le cas avec d'autres instruments de captation style laser terrestre ou laser aéroporté qui ont aussi d'autres usages. On a la chance d'avoir cet engouement pour la photogrammétrie avec des communautés d'utilisateurs qui viennent nourrir la montée en compétences de toute personne qui serait intéressée par ce type de captation.

Existe-t-il des sources participatives?

Participatives, peut-être pas, mais des communautés fortes d'utilisateurs, oui il y en a beaucoup. Il y a l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) qui porte beaucoup la photogrammétrie mais aussi des forums de personnes qui font de la photogrammétrie par drone, des communautés de photographes qui se sont mis aussi à cette captation. Il y a toute une littérature, plutôt de bonne qualité, accessible sur internet et qui donne vraiment un aspect démocratique à la photogrammétrie.

Que je comprenne bien comment ça marche, imaginons que nous trouvons sur un site archéologique avec un élément remarquable, on le prend en photo sous toutes les coutures? On en fait le tour?

Je vais vous faire une réponse de Normand. Soit vous choisissez l'exhaustivité d'un objet d'étude soit vous décidez de faire un focus sur un endroit très particulier. C'est aussi son intérêt. Ce peut être un fronton, une porte, une stèle. En fait, vous mettez le boîtier dans les mains de la personne et vous lui dites « voilà quelle est pour vous la zone la plus pertinente à enregistrer en 3D ». L'intérêt c'est que le sens



Ci-dessus et page de gauche, trois étapes du relevé numérique de la chapelle d'Osiris Ounnefer, Karnak (Égypte).

© Mission sanctuaires osiriens - Cyril Giorgi, Mathilde Ferrari.

et l'exécution restent toujours dans les mains de la personne qui est à l'origine de la demande.

Prenons l'exemple d'un fronton, on va le prendre en photo sous tous les angles d'une façon très codifiée?

Non, hormis le recouvrement c'est une question de bon sens. On va prendre les éléments mais aussi l'environnement immédiat pour pouvoir peut-être un jour l'articuler avec le reste du bâtiment.

Puisqu'on aborde cette question du bon sens numérique, cela me permet de parler d'un autre sujet: maintenant le plafond de verre numérique n'est plus le traitement mais le stockage et l'exploitation des modèles qui sont extrêmement lourds avec des milliers de photos. Comment peut-on stocker tout cela et le pérenniser et, autre question, comment réduire l'impact énergétique de ces stocks? Ne doit-on pas atteindre une forme de pondération, de frugalité numérique?

On peut pourtant penser que dans le temps long toutes ces captations pourront être utilisées dans le cadre de nouvelles techniques?

On parlait de modèle 3D et là vous me parlez de modèle en 4 dimensions. La captation est ponctuelle, c'est un moment



Panneau 101 dit « des Chevaux » en cours de reconstruction et analyses.
© Julien Monney, équipe Cosquer / Ministère de la Culture.

précis dans le temps. Et là vous me parlez d'intervalles, on passe du ponctuel à une parenthèse temporelle... je pourrais vous répondre dans 20 ans...

OK prenons rendez-vous dans 20 ans !

[rires] On n'a pas encore de recul sur ces questions-là. J'ai déjà eu l'occasion de travailler sur des modèles en 4D mais c'était plus un objet d'étude, ce n'était pas pour la captation elle-même.

Quel est l'intérêt de la photogrammétrie pour l'archéologie ?

Il y en a plusieurs. Vous rajoutez une nouvelle documentation. Exemple : l'archéologie du bâti. Si on pense au relevé pierre à pierre manuellement, c'est un dessin normé assez chronophage. La photogrammétrie n'a pas remplacé ce relevé mais elle a donné aux archéologues beaucoup plus de documentation qui peut être utilisée *in situ* mais aussi en retour en laboratoire. Vous ajoutez un nouveau faisceau de présomptions archéologique. Cela vous permet aussi d'avoir une possibilité d'exploration immersive même si ça reste de l'immersion très modeste mais vous pouvez travailler sur un modèle 3D sur votre ordinateur ce qui permet parfois de voir les choses différemment. Cela vous permet de vous affranchir des contraintes physiques de l'observation. Autre point positif, cela ouvre la possibilité du travail collaboratif avec des collègues qui verront peut-être des choses que vous n'avez pas vues.

Bien au chaud et pas les pieds dans la boue !

Oui, c'est bizarre mais parfois cela vous permet de réfléchir plus facilement... [rires]
Dans des lieux difficiles d'accès comme la grotte Cosquer, le fait d'avoir des modèles 3D vous permet de prendre plus

de temps pour explorer ce que vous pouviez voir sur place. Ça complète, ça ne remplacera jamais l'analyse et la prise de décision *in situ*.

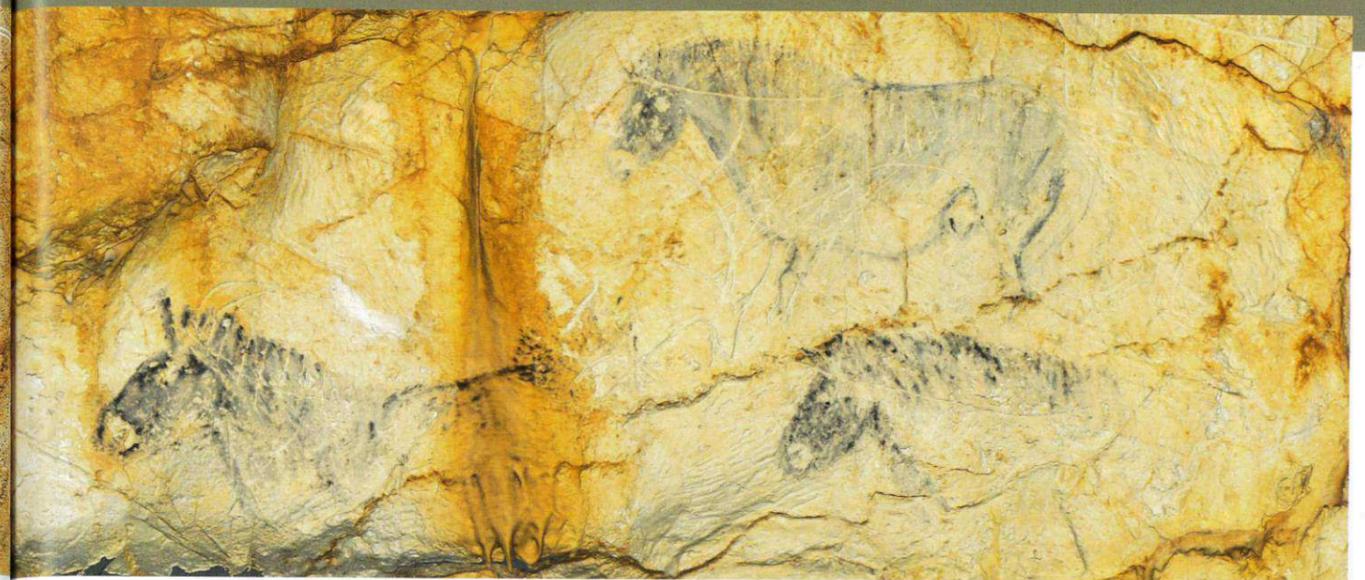
Pourquoi cela ne peut pas remplacer l'observation sur les lieux ?

L'immersion numérique ne remplacera jamais l'immersion personnelle, il vous manquera plein de choses. Ne serait-ce que pour l'instant on travaille sur de la 3D mais sur des écrans plats. Il y a un côté paradoxal. À la limite on peut avoir des casques virtuels. Mais sur place, tous vos sens sont en alerte et vous percevez bien mieux les choses que devant un écran, aussi bon votre objet patrimonial soit-il. Cela reste un complément informel extrêmement fort qui permet de passer beaucoup de paliers cognitifs.

Un autre exemple ?

Karnak, en Égypte. Là, l'intérêt sur ces chapelles osiriennes, c'est que cela nous a permis de démonter virtuellement les monuments pour étude avant démontage, restauration et remontage. C'est quelque chose qui n'était pas possible avant. On n'a pas remplacé l'analyse scientifique de l'archéologue, on lui a offert un nouveau faisceau de présomptions. Cela a aussi permis de faire un état sanitaire du bâtiment. C'est un trait d'union entre différentes problématiques, les problématiques archéologiques, c'est là où mon cœur bat, mais aussi de lier ça aux questions de la conservation, de restauration des monuments, de valorisation des patrimoines, de transmission des savoirs. À Karnak il y avait aussi une autre problématique que Cosquer avec ses problèmes d'accès, c'était celle de la conservation.

Quand on pense aux chantiers archéologiques plus classiques, souvent il y a très peu de reliefs, on est ni à Karnak ni à Cosquer ou Chauvet, est-ce que la



Restitution surfacique finale du panneau 101 dit « des Chevaux ».
© Julien Monney, équipe Cosquer / Ministère de la Culture.

photogrammétrie est utilisée dans ces cas ou elle ne présente que peu d'intérêt ?

Elle va être utilisée pour gérer des orthophotos* pour des relevés de couches stratigraphiques, de coupes, de planimétrie. Attention, là quand vous dites que les reliefs ne se voient pas beaucoup, on est sur un plafond de verre cognitif. On ne les voit pas beaucoup avec nos yeux sur le terrain, mais avec le numérique, comme vous pouvez vous libérer de toute contrainte physique, on peut zoomer à l'infini et les reliefs qui semblent anecdotiques sur le terrain, ne le sont plus du tout, au bureau, devant notre écran d'ordinateur.

À partir de quel moment a-t-on eu accès à cette nouvelle dimension ?

Il y a eu deux facteurs qui ont été décisifs : l'appareil photo numérique et les ordinateurs domestiques. Ça a vraiment commencé il y a une quinzaine d'années. La toute première étude que j'ai pu faire sur la photogrammétrie en archéologie c'était en 2013/2014. C'était sur Pont-Sainte-Maxence un monument funéraire gallo-romain où on a eu la chance de pouvoir travailler avec des membres de l'ENSG, l'école de l'IGN. Là, on est passé dans une autre sphère. On a vu là que la technique était parfaitement déployable sur le terrain.

Hormis la problématique de la conservation que nous avons déjà évoquée, comment voyez-vous l'avenir proche de la photogrammétrie ?

Le développement de cette méthode est son insertion complète avec d'autres méthodes de captation : la lasergrammétrie, le scanner, le géoradar, les images satellitaires. Objectif : créer un jumeau numérique qui est la somme de N-captations, de toutes ces informations qui se complètent et dont les défauts s'annulent. Un jumeau numérique qui sera ouvert au public, avec un modèle qui sera décliné

selon les différentes attentes. Celles d'un archéologue ne sont pas les mêmes que celles d'un conservateur, d'un aménageur du territoire, ou d'un passionné de l'histoire de la grande guerre.

Ces objets n'existent pas encore ou il y a déjà quelques exemples ?

Il y a déjà quelques exemples mais on en est au tout début. Les méthodes, les traitements évoluent tellement rapidement que ce que l'on imaginait à peine hier existe déjà aujourd'hui. C'est peut-être ça le plus compliqué, c'est : « qu'est-ce qu'on pourra faire demain avec des outils qu'on ne fait qu'imaginer maintenant ? ». C'est ça l'avenir. Je réponds aujourd'hui à un type d'attente avec ma campagne de photogrammétrie mais j'essaie d'anticiper son insertion dans un autre corpus.

On est loin de la stéréoscopie avec sa petite réglette en bois.

Oui et non, il ne faut jamais en être très loin. Nos prédécesseurs avaient toujours en tête le bon sens parce que c'était très fatigant de faire de la stéréoscopie manuellement. Il fallait raisonner, faire des efforts rationnels. C'est bien de se souvenir des débuts de cette méthode pour ne pas prendre des millions de photos avant de faire tourner son ordinateur pendant des heures. Non vraiment, où est mon sens ? Hors sol, il n'y a plus de sens. ■

Orthophotos : une orthophoto est un assemblage d'images géoréférencée et corrigée de l'ensemble des déformations géométriques et radiométriques.

Étudier les monnaies anciennes : LES TERRAINS DU NUMISMATE

Épisode 4

Ce quatrième épisode du feuilleton sur les monnaies anciennes, nous emmène au Moyen Âge. Imitations et monnayages parallèles résultent de la volonté de pouvoir échanger des valeurs en dehors des circuits officiels.

PAR THIBAUT CARDON

Saurez-vous faire la différence ?

Trompe-l'œil et imitations médiévales

En France, le pouvoir royal tente, à partir du XIII^e siècle, de faire disparaître les monnayages des comtes, évêques ou ducs. Mais si la frappe de monnaies est une activité très réglementée, elle est aussi une source de revenus. Et pour diffuser ses propres monnaies, quoi de mieux que d'imiter les monnaies royales ? C'est donc un jeu de trompe-l'œil à créer ou à reconnaître qui occupe émetteurs, usagers, législateurs... et numismates. Intéressons-nous au gros* à la fleur de lis, frappé sous le roi de France Philippe VI (1328-1350) (ci-dessous) et à deux imitations, l'une produite par Jean de Chalon, comte d'Auxerre, l'autre par Guillaume II, évêque de Cambrai. Saurez-vous identifier les trompe-l'œil ? ■

« D'ARTNCORVm » (« d'Altisiodor » = « d'Auxerre ») pour « FRANCORVm ». Notez le « A » ligaturé au « R » pour masquer sa présence.

« I'h » (« Iohannes » = « Jean ») pour « Ph » (« Philippvs » = « Philippe »).



Quatre petits points viennent au bout des bras de la croix pour composer la croix dite auxerroise.

Comté d'Auxerre, gros au lis de Jean de Chalon (1304-1361). (BnF, MMA, n° R1101 = FEO-14658) © Gallica.BNE.fr/BNF

Évêché de Cambrai, gros au pseudo-lis de Guillaume II (1337-1342). (BnF, MMA, n° Théry.67.272.377) © Gallica.BNE.fr/BNF



Royaume de France, gros au lis de Philippe VI (1328-1350). (BnF, MMA, piéfort n° ROY-369)

Circulation en circuit fermé

Les méreaux médiévaux

Du XII^e siècle au XIV^e siècle circulent dans le royaume de France de petits objets qui ressemblent beaucoup à des monnaies (rondeur, taille, iconographie), mais qui sont en plomb coulé et qui ne comportent pratiquement jamais d'inscription. Les textes sont avars sur ces objets, nommés « plommés » ou « méreaux », que l'on trouve pourtant abondamment en archéologie. De plus, des objets monétiformes* aux fonctions similaires seront utilisés jusqu'en plein XX^e siècle. Ces objets semblent fonctionner comme des monnaies pour le paiement de salaires dans des contextes très spécifiques, avec une circulation en circuit fermé, tels que des chantiers de construction. Un des enjeux est d'en comprendre la production et de dresser une

typo-chronologie*. Les méreaux présentent souvent des restes du canal de coulée, trace de leur fabrication à l'aide de moules, qui ont parfois été retrouvés. En Normandie, l'étude croisée des moules, des contextes de trouvaille archéologique, et de plusieurs « bourses » de ces méreaux a permis de poser quelques jalons. Une diversité de types monétaires sont produits de façon synchrone avec un même moule, mais avec toujours la même forme de croix (simple, cantonnée, tréflée, etc.), qui est dès lors un bon critère datant. La présence parfois abondante de méreaux dans certaines abbayes normandes pose enfin la question de la place tenue par ces quasi-monnaies au sein de ces institutions. ■



1cm

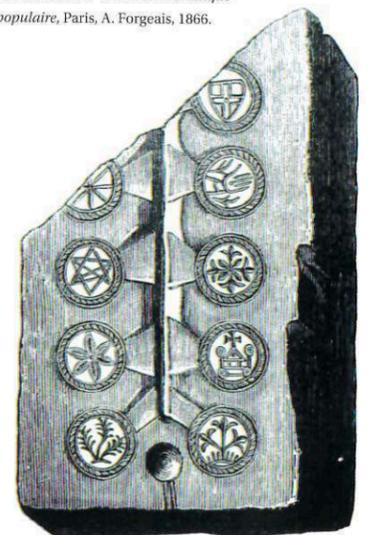
Méreaux monétaires (fin du XII^e siècle ?) au type du « peigne provinois » (Alisay, Le Postel, bloc N_71028). © Inrap.



Denier du comte de Champagne Henri I^{er} (1152-1180) au type du « peigne provinois » (Poey d'Avant 1862, n° 5975).

© Faustin Poey d'Avant, *Monnaies féodales de France*, t. 3, Paris, Maison Florange, 1862.

Dessin d'une matrice de moule à méreaux trouvée à Paris en 1863 et figurant plusieurs avers différents (Forgeais 1866). © Arthur Forgeais, *Collection de plombs historiés trouvés dans la Seine*, 5^e série. Numismatique populaire, Paris, A. Forgeais, 1866.



D'après un ouvrage réalisé par les étudiants de la promotion 2022-2023 du master *Métiers du livre et de l'édition* de l'université de Caen Normandie.

Étudier les monnaies anciennes, les terrains du numismate.
À vue d'œil, UFR HSS / CRAHAM, 2023.

Gros: le « gros », ou « gros denier », est un terme apparaissant en France au XIII^e siècle pour désigner des monnaies d'argent de plus forte valeur que le denier, et avec un plus haut titre. Pour le monnayage royal, le terme désigne dès 1270 un multiple valant souvent 12 deniers tournois (le gros tournois), et à partir du XIV^e siècle un multiple valant 20 deniers tournois.

Monétiforme: néologisme signifiant « qui a la forme d'une monnaie », et comprenant notamment les médailles, jetons, poids monétaires et méreaux.

Typo-chronologie: se fonde sur l'évolution des caractéristiques des objets. Les archéologues et les spécialistes peuvent dater les objets par comparaison à des typologies de référence.