



## ARCHEOLOGIA E CALCOLATORI

CNR – DIPARTIMENTO SCIENZE UMANE E SOCIALI, PATRIMONIO CULTURALE  
ISTITUTO DI STUDI SUL MEDITERRANEO ANTICO

Rivista annuale open access e peer-reviewed  
fondata da MAURO CRISTOFANI e RICCARDO FRANCOVICH

Comitato Scientifico: DANIEL ARROYO-BISHOP, JOHN BOARDMAN, ROBIN B. BOAST,  
FRANCISCO BURILLO MOZOTA, CHRISTOPHER CARR, MARTIN O.H.  
CARVER, ANGELO CERIZZA, FRANCESCO D'ANDRIA, IVAN DI STEFANO  
MANZELLA, FRANÇOIS DJINDJIAN, JAMES E. DORAN, MICHAEL EISNER,  
SALVATORE GARRAFFO, FILIPPO GIUDICE, ANNE-MARIE GUIMIER-  
SORBETS, IAN HODDER, F. ROY HODSON, DONNA C. KURTZ, ADRIANO  
MAGGIANI, DANIELE MANACORDA, PAOLA MOSCATI, TITO ORLANDI,  
CLIVE R. ORTON, FRANCESCO RONCALLI, PAOLO SOMMELLA, ALBERTUS  
VOORRIPS

Direttore responsabile: PAOLA MOSCATI

Redazione: GIOVANNI AZZENA, CLAUDIO BARCHESI, ALESSANDRA CARAVALE,  
LETIZIA CECCARELLI, ANTONIO GOTTARELLI, MARIA PIA GUERMANDI,  
MARIA CECILIA PARRA, ALESSANDRA PIERGROSSI, GRAZIA SEMERARO,  
GIANLUCA TAGLIAMONTE, MARCO VALENTI

Autorizzazione del presidente del Tribunale di Firenze n. 3894 del 6/11/1989

Indirizzo Redazione: Rivista «Archeologia e Calcolatori», CNR – ISMA, Area della Ri-  
cerca di Roma 1, Via Salaria Km 29,300, 00015 Monterotondo Stazione (RM)  
Tel. +39.06.90672284 – Fax +39.06.90672818  
E-mail: [paola.moscatti@isma.cnr.it](mailto:paola.moscatti@isma.cnr.it)  
<http://soi.cnr.it/archcalc/>

Edizione e distribuzione: Edizioni ALL'INSEGNA DEL GIGLIO s.a.s.,  
Via della Fangosa 38, 50032 Borgo San Lorenzo (FI)  
Tel. +39.055.8450216 – Fax +39.055.8453188  
E-mail: [info@edigiglio.it](mailto:info@edigiglio.it) – [ordini@edigiglio.it](mailto:ordini@edigiglio.it) – [redazione@edigiglio.it](mailto:redazione@edigiglio.it)  
<http://www.insegnadelgiglio.it/>

Actes des 3<sup>èmes</sup> Journées d'Informatique  
et Archéologie de Paris – JIAP 2012  
(Paris, 1-2 juin 2012)

sous la direction de  
Laurent Costa, François Djindjian, François Giligny

ARCHEOLOGIA E CALCOLATORI  
Supplemento 5, 2014

*All'Insegna del Giglio*

*Volume edito con il sostegno dell'Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne e del  
CNRS (UMR 7041 ArScAN & UMR 8215 TRAJECTOIRES)*

Realizzazione grafica della sovracoperta di Marcello Bellisario  
ISSN 1120-6861  
ISBN 978-88-7814-590-0  
© 2014 – All'Insegna del Giglio s.a.s. – [www.insegnadelgiglio.it](http://www.insegnadelgiglio.it)  
Stampato a Firenze nell'aprile 2014

## SOMMAIRE

L. Costa, F. Djindjian, F. Giligny, <i>Avant-Propos</i>	7
P. Moscati, <i>Parcours culturels pour une histoire de l'informatique appliquée à l'archéologie</i>	9
F. Djindjian, <i>Simuler une "artificial society": organisation sociale, gouvernance et attitudes societales</i>	18
M. Belarbi, P. Raymond, N. Saulière, R. Touquet, <i>Expérience de relevé par photogrammétrie en archéologie préventive</i>	34
S. Cassen, V. Grimaud, L. Lescop, D. Morel, G. Querré, <i>Bienfaits et limites d'un enregistrement lasergrammétrique dans la tombe à couloir de Gavrinis (Morbihan, France)</i>	47
J.-B. Lemerle, S. Varéa, <i>AFT: scannographie 3D appliquée à l'archéologie et au patrimoine</i>	60
J.-L. Biscop, M. Kurdy, <i>Numérisation 3D du site de Saint-Syméon (Syrie)</i>	77
E. Robert, Y. Egels, E. Boche, M. Peyroux, D. Vialou, P. Paillet, D. Vigears, <i>Applications 3D pour la contextualisation et le relevé d'art en grotte ornée</i>	88
H. Plisson, <i>3D en kit: des solutions pour la tracéologie et au-delà</i>	102
A. Flammin, <i>L'utilisation des relevés scannographiques en archéologie du bâti médiéval: l'exemple de l'église de Veyrines (Ardèche)</i>	117
S. Eusèbe, <i>La 3D au service de l'observation archéologique et de son illustration scientifique</i>	128
L. Borel, Y. Egels, E. Laroze, <i>Photogrammétrie appliquée à l'étude architecturale et archéologique, exemples de quelques chantiers récents en Égypte</i>	137
B. Dufaÿ, <i>La modélisation 3D de grands ensembles monumentaux de la restitution au public à la recherche scientifique</i>	149
J. Rollier, Z. Petty, A. Mazuir, S. Faucher, J.-F. Coulais, G. Rollier, <i>Développement d'un SIG 4D pour la ville médiévale de Cluny</i>	164
R. Gagne, V. Gouranton, B. Arnaldi, G. Dumont, A. Chauffaut, <i>Immersia, an open immersive infrastructure: doing archaeology in virtual reality</i>	180
G. Vatin, N. Bianchi, <i>SIG des Merveilles: analysing rock art distribution with a web cartographic platform</i>	190

C. Bourlet, L. Costa, H. Noizet, <i>Méthodologies et apports du projet ALPAGE pour l'espace parisien médiéval: l'exemple du géocodage des contribuables vers 1300</i>	201
F. Pouget, <i>Le webmapping: outil de travail des archéologues. Exemple du projet Marais de Brouage</i>	211
L. Bernard, <i>ArkeoGIS v2.0, Elements d'analyse de la mise en ligne de bases multilingues sur fond cartographique: fonctionnalités, apports et limites</i>	228
A. Del, J. Schoevaert, <i>Les apports d'un modèle conceptuel de données à l'étude des composantes urbaines d'Ostie</i>	238
A. Bolo, M. Muylder, C. Font, T. Guillemard, <i>De la tablette PC à la cartographie de terrain: exemple de méthodologie sur le chantier d'archéologie préventive de Noyon (Oise)</i>	247
R. Letricot, A.-V. Szabados, <i>L'ontologie CIDOC CRM appliquée aux objets du patrimoine antique</i>	257

## AVANT-PROPOS

Les 3<sup>èmes</sup> Journées d'Informatique et Archéologie de Paris (JIAP 2012) ont eu lieu les 1 et 2 juin 2012 à l'Institut d'Art et d'Archéologie, dans son Grand Amphithéâtre. Comme les années précédentes des communications sur l'actualité de la recherche se sont succédé et un thème d'actualité a été choisi. La 3D dans ses différentes composantes, à savoir acquisition, traitement, diffusion, a été le point fort de cette édition.

Soulignons que, comme pour les sessions de 2010 et 2008 qui avaient réunies chacune plus de cent personnes pour une trentaine de communications, la session de 2012 a connu un succès indéniable avec encore une fois plus de 100 inscrits pour un total de 33 propositions de communications. Les JIAP s'affirment donc comme un rendez-vous attendu et apprécié de la communauté française et internationale, tant des archéologues que des informaticiens. Elles permettent avec une temporalité bisannuelle de confronter les expériences des différentes équipes du monde de l'archéologie francophone, de connaître et de faire connaître des expériences en cours et de construire un réseau d'échange. 21 articles sélectionnés composent le présent volume et viennent traduire les différents débats qui ont animés cette édition. Ils marquent, par leur exemplarité, les tendances actuelles de la recherche.

Parmi les mots clés que l'on peut retenir, on pourra citer sans être exhaustif: parcours culturels, processus, acquisition et modélisation tridimensionnelle, SIG, plateformes géo-collaboratives, ontologies, etc. Ces mots avec les implications technologiques qu'ils sous-entendent forment aujourd'hui le quotidien de la plupart des archéologues. Cette diversité des notions est à mettre en exergue, car elle est l'expression d'une interaction forte, de plus en plus complexe entre le monde des technologies qui serait plutôt celui des ingénieurs, et celui de la recherche et des chercheurs. C'est donc ce mélange, cette hybridation, qui définit aujourd'hui les pratiques de recherche en Archéologie et plus globalement celles des Sciences Humaines et Sociales. Dans ce contexte, il est donc nécessaire de développer les espaces de rencontre et de confrontation pour construire sur la base de l'expérience les outils de la recherche de demain.

À l'heure où ces lignes sont écrites, la préparation de la nouvelle édition des JIAP en 2014 est en cours. Elle se tiendra durant le CAA (Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology) que nous avons l'honneur d'organiser à Paris à l'Université de Paris I Panthéon – Sorbonne et qui permettra aux acteurs de la recherche française de partager leurs approches avec les meilleurs acteurs de la recherche internationale.

Enfin remercions les organisateurs de ces journées ainsi que tous les participants communicants et auditeurs qui participent de ces échanges. Une mention spéciale à l'éditeur de cet ouvrage, pour son aide ainsi que le programme Bassin Parisien, l'UMR ArScAn et l'UMR Trajectoires qui ont participé à son financement.

Laurent Costa, François Djindjian, François Giligny

## PARCOURS CULTURELS POUR UNE HISTOIRE DE L'INFORMATIQUE APPLIQUÉE À L'ARCHÉOLOGIE

### 1. Le projet

Un projet international dédié à l'histoire de l'informatique appliquée à l'archéologie a été récemment promu par l'Accademia Nazionale dei Lincei et le CNR (Moscati 2010, 2012a)<sup>1</sup>. Ce projet entend reparcourir les principales étapes du développement de l'application de l'informatique en archéologie, secteur de la recherche, ou pour mieux dire, discipline récente et en incessante évolution qui conjugue l'étude de l'antiquité avec les méthodologies informatiques modernes. Cette matière plonge ses racines dans les années Cinquante du XX<sup>e</sup> siècle, quand l'archéologie a accueilli des procédures d'enquêtes scientifiques et techniques en les adaptant aux exigences spécifiques de sa propre recherche.

Grâce à la mise en place d'un réseau international de contacts, qui peut se prévaloir des collaborations déjà mises en œuvre tant dans le contexte de la revue «Archeologia e Calcolatori», publiée par le CNR à partir de 1990 et référence de tout le secteur au niveau international, qu'au cours des conférences organisées auprès du Centro Linceo Interdisciplinare "Beniamino Segre" de l'Accademia Nazionale dei Lincei, on entend créer un dépôt de ressources numériques relatives à l'histoire de l'informatique archéologique, susceptible d'être consulté sur la toile.

L'expérience de «Archeologia e Calcolatori» (<http://soi.cnr.it/archcalc/>) est bien connue de tous les experts de ce secteur, que ce soit au travers des vingt numéros jusqu'ici publiés ou des numéros spéciaux et des Suppléments. Je voudrais seulement mettre l'accent sur la nouvelle politique d'édition de la revue qui, en adhérant à l'Open Archives Initiative dès 2005 et en s'alignant sur les principes affirmés dans la Berlin Declaration on Open Access to Knowledge in the Sciences and Humanities pour un accès ouvert à la littérature scientifique, est devenue à tous les effets une revue à l'accès ouvert (Moscati 2012b).

En ce qui concerne le Centro Linceo Interdisciplinare ([http://www.lin-  
cei.it/modules.php?name=Centro\\_Linceo](http://www.lin-<br/>cei.it/modules.php?name=Centro_Linceo)), celui-ci a consacré, au cours des années, un espace spécifique à certaines thématiques de nature théorique et méthodologique relatives à l'informatique appliquée aux Sciences Humaines,

<sup>1</sup> Je tiens à remercier François Djindjian pour l'invitation à participer aux 3<sup>èmes</sup> Journées d'Informatique et Archéologie de Paris et lui exprimer ma reconnaissance pour son enseignement qui remonte désormais à trente ans.

comme le problème de l'intégration et de la formalisation des données, le traitement des textes ou la mise en archives informatisée du patrimoine culturel. Certaines conférences ont concerné de façon plus spécifique l'archéologie, comme celle sur les modèles dans la recherche archéologique de l'année 2000 (*I modelli* 2003) ou celle sur la naissance de l'informatique appliquée à l'archéologie en 2008 (Moscati 2009). Parmi les présences internationales récurrentes dans le contexte de ces manifestations, je tiens à rappeler le lien qui nous a uni à la France et, en particulier, à Jean-Claude Gardin, Anne-Marie Guimier-Sorbets et François Djindjian.

## 2. Le musée virtuel

Dans le cadre de ce projet, parmi les objectifs poursuivis, citons également la réalisation d'un "Musée virtuel de l'informatique archéologique", dont le but est d'illustrer les racines de cette discipline et d'en retracer le développement. Cette initiative avait déjà été présentée sous forme de prototype à l'occasion de la Conférence de 2008 auprès de l'Accademia Nazionale dei Lincei. Elle était, à l'époque, fondée sur l'aménagement de trois salles d'exposition, dédiées aux protagonistes, aux méthodologies et aux technologies, dans le but d'offrir un panorama de l'histoire des recherches, inscrites dans le contexte des principaux secteurs de recherche archéologique impliqués dans le processus de numérisation des données.

Au cours de la conférence, on avait installé six postes multimédias, consacrés à autant de thématiques de nature méthodologique: la mise en catalogue du patrimoine culturel, les banques de données, la cartographie et les SIG, les systèmes multimédias, l'Internet et les musées. Pendant la conférence, on a présenté également certaines interviews virtuelles faites aux pionniers de l'application de l'informatique à l'archéologie. Parmi ceux-ci, on peut rappeler Jean-Claude Gardin, George Cowgill, James Doran, Amilcare Bietti, et Albertus Voorrips.

Au cours de la nouvelle phase de réalisation du Musée virtuel, on a envisagé de modifier les modalités utilisées pour le prototype et de passer à un outil de gestion de contenu open source ou CMS (Content Management System). Le choix s'est porté sur le CMS Museo&Web (Natale, Saccoccio 2010), kit d'élaboration d'un site web de qualité pour un musée de petite ou moyenne dimension, dont le prototype a été développé dans le cadre du projet européen MINERVA, lancé en 2002 sous l'égide du Ministère italien de la culture. Ce projet regroupait des représentants des ministères concernés ou d'agences publiques de nombreux États-membres, dans l'objectif conjoint de promouvoir une approche partagée et une méthodologie commune pour la numérisation de contenus culturels européens. Les principes de qualité des sites Internet culturels peuvent être ainsi résumés: chaque site doit être

identifiable, ciblé, maintenu, accessible, ergonomique, interactif, multilingue, interopérable, respectueux des droits, pérenne.

Nous avons choisi ce système à la lumière de l'expérience déjà conduite par l'Istituto di Studi sul Mediterraneo Antico du CNR pour la création du site web des nécropoles de Cerveteri et Tarquinia, introduites depuis 2004 dans la liste des sites "Patrimoine de l'UNESCO" (<http://www.cerveteri.beniculturali.it/>). Ce système, qui bien convient aux exigences d'une exposition dans un musée ou d'un itinéraire culturel dans un territoire, comprend un ensemble de modules standards spécialisés pour la gestion des contenus. Chaque module permet de gérer des données structurées qui peuvent alors être plus facilement représentées et recherchées dans le CMS. Parmi ces modules on peut citer, en particulier, le module Œuvres, pour la publication de fiches d'œuvres d'art; Itinéraires et étapes, pour la publication d'itinéraires touristiques-culturels; Parcours thématiques pour créer des itinéraires thématiques ou des expositions virtuelles. Récemment, un nouveau module, le Module Builder, permet d'importer et puis publier dans le CMS des archives de données provenant de sources externes. En plus, en conformité avec les *W3C Recommandations*, le CMS Museo&Web permet d'éditer les métadonnées de chaque page web selon la structure proposée par le Dublin Core (<http://dublincore.org/>).

Sur la page d'accueil du site web du Musée virtuel de l'informatique archéologique, nous avons prévu deux types différents de consultation. En effet, à côté d'une méthode traditionnelle de navigation dans le contenu, qui repose sur l'ordre chronologique des événements et sur la mise en ligne des documents, on a prévu des parcours culturels. Là, les experts de chaque domaine d'application seront invités à décrire leurs expériences, à reconstruire les phases de fondation des institutions et des laboratoires dédiés à l'application de l'informatique à l'archéologie et à proposer de nouvelles voies de recherche.

Nous partons donc du menu de navigation traditionnel, dominé par la figure de Pénélope qui dirige la visite, en accompagnant les visiteurs dans le site. Le choix n'est pas fortuit, mais il se réfère aux premières années d'expérimentation des techniques de documentation automatique des classes d'objets archéologiques. Dans la brochure du "Centre d'analyse documentaire pour l'archéologie", publiée à la fin des années cinquante, Jean-Claude Gardin a choisi Pénélope comme témoin de ses réflexions (Fig. 1). Voici ce qu'il écrivait à l'époque: «Les éléments d'information passent par un cycle sans fin d'analyses et de synthèses, chaque auteur décomposant les données assemblées dans les ouvrages de ses prédécesseurs, pour les "relier" à son tour dans ses propres publications, qui, elles-mêmes, seront disséquées, et ainsi de suite. La démarche proposée consiste au contraire à conserver les données sous forme analytique, et à les mettre, sous cette forme, à la disposition des érudits» (Gardin 1959; cf. aussi Gardin 1960).

Fig. 1 - Page d'accueil du site web (<http://archaeologicalcomputing.lincei.it/>).

Fig. 2 - Établissement d'un répertoire mécanographique au CADA (Gardin 1959, 20).

Fig. 3 – Page web dédiée aux protagonistes.

Fig. 4 – Page web dédiée aux publications.

Dans ce nouveau prototype, on a prévu globalement, huit liens qui permettent de reparcourir l'histoire de l'informatique archéologique:

- L'histoire, répartie en décennies, à partir des années Cinquante jusqu'au XXI<sup>e</sup> siècle;
- Les protagonistes, répartis en précurseurs, pionniers et promoteurs;
- Les institutions, réparties en ministères, centres de recherche, universités et associations;
- Les grands projets d'informatisation des données archéologiques, comme par exemple les *corpora* ou les Atlantes digitales du monde ancien;
- Les grands évènements, répartis en congrès et expositions;

- Les méthodes, de la représentation des données à leur interprétation;
- Les techniques pour l'acquisition, l'élaboration, la restitution, l'editing et la divulgation des informations;
- La documentation, répartie en archives, bibliographies, publications.

Le but de cette section du site est d'offrir les informations nécessaires pour avoir une vision d'ensemble des moments initiaux de l'entrée de l'automatisation dans les processus de la recherche archéologique, qui sont aussi liés à la naissance de la mouvance de la *New Archaeology*, et des développements successifs, tout en réservant un espace également aux problèmes théoriques, méthodologiques et en offrant une série d'instruments pour permettre aux usagers d'approfondir leur connaissance en la matière. La phase actuelle du projet concerne donc l'implémentation du site, sur la base des données acquises au cours de tant d'années d'expérience dans ce secteur d'enquête, et de la contribution indispensable de chercheurs intéressés à diffuser leurs propres expériences de recherche.

### 3. Modalités de recherche des informations

Afin d'illustrer les modalités de recherche des informations dans le site web, nous prenons par exemple le cas des protagonistes, et en particulier des précurseurs (1950-1960) et des pionniers (1970), dont nous sommes en train d'insérer les biographies et les bibliographies. Chaque protagoniste est introduit à partir d'une image et d'une phrase qui a été considérée comme une attestation significative de sa carrière scientifique, et des liens aux pages du site web qui contiennent la biographie, la bibliographie et une section de documents dans laquelle on pourra trouver, autant que possible, documents inédits, littérature grise, etc. De façon automatique, les biographies permettent l'identification des institutions spécifiques créées par les protagonistes ou auxquelles ils ont donné un élan novateur, ainsi que les congrès ou les expositions promus et les méthodes et les instruments utilisés.

En ce qui concerne la documentation, nous prenons le cas des publications, et en particulier celui des revues, auxquelles s'ajoutent également les lettres d'information, dont les premières sont la «*Newsletter of Archaeological Computing*» (1965) – puis «*Advances in Computer Archaeology*» – «*Archéologues et ordinateurs*» (1982), et «*Archaeological Computing Newsletter*» (1985). Les fiches descriptives sont brèves et de lecture aisée dès lors que, le cas échéant, l'intention est de laisser parler la documentation pertinente: on renvoie en effet aux sites web, quand ils existent, à des éditoriaux à vocation programmatique, à des témoignages individuels ou, enfin, à la lecture d'articles qui revêtent une particulière importance pour l'histoire et le développement des revues elles-mêmes.

Un autre exemple est représenté par les banques des données et les *corpora* archéologiques qui, de par leur nature, ont pu se prévaloir des instruments mis au point pour la mise en archives et la gestion informatisée des données. Je me réfère en particulier au Beazley Archive (<http://www.beazley.ox.ac.uk/>), au *Corpus Vasorum Antiquorum* (<http://www.cvaonline.org>), à EAGLE (<http://www.eagle-eagle.it/>), au *Lexicon Iconographicum Mythologiae Classicae* (<http://www.limc-france.fr/>). Dans ce cas également, aussi bien les contenus de la fiche que l'appareil à caractère informatif additionnel suivent les mêmes principes que ceux appliqués aux publications.

#### 4. Le fonds Équipe “archéologie de l'Asie centrale” et Jean-Claude Gardin

Quand on parle des *corpora* archéologiques, il est nécessaire de faire une brève mais incontournable parenthèse sur l'activité promue, dès les années Cinquante, par Jean-Claude Gardin et son équipe de recherche. La consultation des archives de la Maison Archéologie et Ethnologie, René Ginouvès, et spécialement du Fonds Équipe “Archéologie de l'Asie centrale” et Jean-Claude Gardin (dorénavant *Fonds Gardin*), auxquels il m'a été possible d'accéder et dont je suis en train de terminer la lecture, contiennent la documentation produite auprès du Centre d'Analyse Documentaire pour l'Archéologie, dirigé par Jean-Claude Gardin, en vue de la création de “codes” permettant de décrire et de classer de façon cohérente et formalisée divers types d'objets archéologiques. Citons, par exemple, les armes et les outils en métal, les cylindres orientaux, les monnaies, les formes de poteries, les ornements géométriques, les représentations figurées sur les vases grecs, etc. Tous ces codes sont préservés dans les archives sous leur forme originelle (*Fonds Gardin*, JCG 157-169), assortis du dispositif documentaire pertinent, qui offre une importante grille d'interprétation de l'approche intellectuelle de l'équipe de recherche pour décrire et classer les objets archéologiques, moyennant l'application de la mécanographie et l'utilisation de cartes perforées.

Le Centre d'Analyse Documentaire pour l'Archéologie, en effet, est l'évolution de la Mission de documentation mécanographique en archéologie, composée de trois membres parmi lesquels Gardin lui-même, instituée par le CNRS en 1955 à l'Institut français d'archéologie de Beyrouth et puis du Centre mécanographique de documentation archéologique, crée en 1957 toujours sous l'égide du CNRS. Déjà en 1958, donc, au sein du Comité de Direction, présidé par Henri Seyrig, directeur de l'Institut français d'archéologie de Beyrouth, on discutait sur l'édition des fichiers mécanographiques. Selon Seyrig «les catalogues mécanographiques constituent un instrument de travail qu'il convient de rendre accessible au plus grand nombre de spécialistes possible. À cette fin, il faut envisager de les publier de la même façon qu'un ouvrage imprimé» (*Fonds Gardin*, JCG

## 5. Instruments de recherche divers

Pour la documentation, nous avons l'intention de mettre en ligne une série d'instruments d'information et documentaires. Par exemple, la bibliographie des applications informatiques à l'archéologie, publiée au cours des années Quatre-vingt-dix dans la revue «Archeologia e Calcolatori». Il s'agit d'environ 2500 titres réunis selon un grand effort de coordination, au fil d'une période où les instruments destinés à la recherche et à l'échange international ne pouvaient encore se prévaloir des moyens mis aujourd'hui à la disposition de notre communauté. Cette collecte de données, qui s'appuiera sur une contribution directe des chercheurs à l'aide d'interface de saisie en ligne, sera d'une grande utilité pour l'analyse des différentes applications de l'informatique et de la statistique à l'archéologie, selon une répartition qui pourra être proposée aussi bien par sujets que par pays ou par institutions pilotes.

Un autre instrument de recherche que nous sommes en train de mettre au point s'oriente vers l'interrogation des contenus des articles publiés dans la revue «Archeologia e Calcolatori». Le but, pour le moment, est d'étudier la terminologie en italien, pour vérifier l'incidence des technologies informatiques non seulement sur les méthodologies de recherche traditionnelles mais également sur le langage scientifique utilisé par les archéologues. Dès lors que la revue «Archeologia e Calcolatori» constitue un *unicum* dans ce secteur d'étude, le *corpus* textuel se prête bien à une analyse terminologique capable de mettre en lumière la spécificité et l'évolution de ce langage et d'offrir une représentation systématique du domaine de référence. D'un point de vue technique, on entend coder les textes électroniques en utilisant la TEI Lite, une version simplifiée des *Recommandations* de la Text Encoding Initiative (<http://www.tei-c.org/>).

En ce qui concerne les parcours culturels, il a été prévu dans le projet de reproposer les mêmes termes identifiés dans le menu de navigation, mais dans l'intention d'ouvrir de nouvelles pages structurées à l'instar d'itinéraire touristique. Autrement dit, il s'agit de reproposer pour l'histoire de cette discipline ce qui a été fait pour la nécropole de la Banditaccia à Cerveteri, moyennant la description d'itinéraires spécifiques et de leurs étapes (<http://www.cerveteri.beniculturali.it/index.php?it/161/itinerari>). Ces pages seront également utilisées pour recueillir les témoignages directs des protagonistes, tant au travers de leurs écrits que de leur narration personnelle. C'est là le cœur de tout le projet: il réclamera certainement un grand effort de coordination internationale, que nous nous apprêtons à déployer avec optimisme. Optimisme qui découle du fait que dans tous les cas où nous avons contacté des chercheurs qui se sont personnellement engagés pour favoriser l'entrée de l'automatisation dans le processus de la recherche archéologique, nous avons toujours rencontré une collaboration scientifique fructueuse et enthousiaste,

symptôme de la volonté d'éviter de disperser un patrimoine théorique et méthodologique de connaissances qui, peu à peu, est en train de s'amenuiser face à la prédominance de la technologie.

Paola Moscati

Istituto di Studi sul Mediterraneo Antico  
CNR – Roma

## BIBLIOGRAPHIE

- Gardin J.-C. 1959, *Le Centre d'Analyse Documentaire pour l'Archéologie*, Paris, CNRS.
- Gardin J.-C. 1960, *Les applications de la mécanographie dans la documentation archéologique*, «Bulletin des Bibliothèques de France», 5-16 (<http://bbf.enssib.fr/consulter/bbf-1960-01-0005-001>).
- I modelli nella ricerca archeologica. Il ruolo dell'informatica*, Atti del Convegno internazionale (Roma 2000), Roma 2003, Accademia Nazionale dei Lincei.
- Moscati P. (ed.) 2009, *La nascita dell'informatica archeologica*, Atti del Convegno internazionale (Roma 2008), «Archeologia e Calcolatori», 20, 2009.
- Moscati P. 2010, *A virtual history of archaeological computing*, in A. Ferrari (ed.), *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Congress on Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin (Cairo 2009)*, Roma, 387-390.
- Moscati P. 2012a, *Description languages for cultural heritage documentation*, in A. Ferrari (ed.), *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Congress on Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin (Istanbul 2011)*, Roma, 215-220.
- Moscati P. 2012b, *Archeologia e Calcolatori*, in N. Palazzolo (ed.), *Diritto romano e scienze antichistiche nell'era digitale*, Convegno di studio (Firenze 2011), Collectanea Graeco-Romana 10, Torino, Giappichelli, 75-79.
- Natale M.T., Saccoccio R. 2010, *Museo&Web: un kit pratico per le istituzioni culturali che vogliono realizzare un sito web di qualità*, «Archeologia e Calcolatori», 21, 27-47.

## ABSTRACT

The Author illustrates an international research project on the history of archaeological computing which was promoted by the Accademia Nazionale dei Lincei and the Italian CNR. As part of this project, a website dedicated to the virtual museum of archaeological computing is currently under construction, with the purpose of retracing the roots and reconstructing the development of this recent and evolving discipline. Along with a more traditional navigation method into the subject matter, which is presented in chronological order, some cultural itineraries have been planned: scholars will be invited to share stories, illustrate the establishment of institutions or laboratories dedicated to computer applications in archaeology and propose innovative research paths.

## SIMULER UNE “ARTIFICIAL SOCIETY”: ORGANISATION SOCIALE, GOUVERNANCE ET ATTITUDES SOCIETALES

### 1. Introduction

La reconstitution des sociétés du passé par l’approche archéologique est un domaine d’application de l’étude des systèmes complexes. L’expression “système complexe”, telle qu’elle apparaît dans les instances de la recherche internationale actuelle, renouvelle ou réactive des concepts anciens, développés sinon nés dans l’après deuxième guerre mondiale: la théorie des jeux (Von Neumann 1928; Morgenstern 1944) et la dynamique des systèmes dans les années 1960 (J.W. Forrester), mais en y incorporant les résultats de recherches plus récentes: systèmes non linéaires, théorie du chaos, fractales, systèmes d’apprentissage (réseaux de neurones), systèmes multi-agents, etc.

Un système complexe est, par définition, un système composé d’un grand nombre d’entités en interaction locale et simultanée, qui présente la plupart des comportements suivants:

- L’auto-organisation et l’émergence de structures cohérentes;
- La robustesse locale et la contrôlabilité à moyenne échelle du système;
- La connaissance d’une partie du système ne permet pas d’affirmer que le reste du système est en moyenne dans le même état (brisure de symétrie);
- Plusieurs comportements possibles sont en compétition, certains sont simples, d’autres chaotiques;
- Plusieurs échelles temporelles et spatiales apparaissent (système fractal).

Depuis les années 1970, plusieurs de ces techniques de modélisations ont été appliquées en archéologie, de façon expérimentale, et avec des succès variés (Doran 1990; Djindjian 2011, §IV.2)

L’étude de la dynamique des systèmes (linéaires) possédant des interactions complexes et des rétroactions de leurs principales composantes est du domaine de la théorie des systèmes (Forrester 1968; *Urban Dynamics* 1969; *World Dynamics* 1970, au M.I.T.). Dans cette approche, le modèle s’attache à étudier les interactions entre les principales composantes du système étudié, à partir d’un ensemble d’équations linéaires et d’équations différentielles, qui conduisent à définir une matrice d’interaction dont les propriétés permettent la mise en évidence de solutions d’équilibre, indépendantes du temps. La donnée de l’état initial du système est indispensable pour démarrer la simulation. Cette technique a été utilisée pour l’élaboration de nombreux modèles de peuplement (Thomas 1972; Zubrow 1975; O’Shea 1978; Black 1978; Ammermann, Cavalli-Sforza 1984; Reynolds 1986) et de population

(Martin 1972; Ward *et al.* 1973; Wobst 1974; MacArthur *et al.* 1976). Lowe (1985) l'utilise pour étudier l'effondrement maya.

La théorie des jeux, qui met en jeu un modèle dans lequel plusieurs groupes (et non plus un seul) concourent à atteindre des objectifs différents, par la voie du conflit ou de la collaboration n'a pas été appliquée en archéologie.

Parallèlement, la théorie des fractales de B. Mandelbrot (1983) qui possède des rapports étroits avec la théorie du chaos, a d'intéressantes applications en archéologie (Brown *et al.* 2005), notamment dans le domaine de la tracéologie (caractérisation mathématiques des polis), de la fragmentation (débitage lithique, cassure des céramiques), de l'analyse spatiale de la distribution des sites (loi de Zipf-Mandelbrot) et des systèmes dynamiques non linéaires notamment pour l'étude des transitions dans le monde vivant (Nottale *et al.* 2000). De même, la théorie des catastrophes du français Thom (1972) propose une modélisation applicable quand des forces se modifiant graduellement produisent des effets soudains, appelés catastrophes, du fait de leur nature discontinue, non seulement dans le temps, mais aussi dans les formes, c'est la morphogenèse. Renfrew (1978), Renfrew et Cooke (1979) ont introduit l'utilisation de cette modélisation en archéologie.

L'hypothèse linéaire sous-jacente à la dynamique des systèmes de J.W. Forrester en limitait considérablement les applications dans les Sciences Humaines et Sociales. Les travaux d'I. Prigogine (1968) sur les systèmes non linéaires et de T-Y. Li et J.A. Yorke en 1975 sur la théorie du chaos (systèmes dynamiques sensibles aux conditions initiales), allaient relancer les travaux de modélisation en archéologie à la fin des années 1990 (Van Der Leeuw, Mc Glade 1997; Beekmann, Baden 2005). McGlade et Allen (1986) étudient le système d'horticulture Huron au moyen d'équations différentielles non linéaires avec des variables stochastiques. Ils soulignent l'équilibre instable du système et le stress permanent des populations, qu'une approche fonctionnelle n'aurait pu déceler. Néanmoins, ces applications sont restées très limitées, même si la nature de la non linéarité des processus socioculturels étaient admise par tous.

C'est alors que les travaux précurseurs de Doran (cf. *infra*), sur les systèmes multi-agents, allaient commencer à se développer en archéologie à partir de la toute fin des années 1990.

## 2. Quelques applications de systèmes multi-agents en archéologie

Un système multi-agent (SMA) est un système composé d'un ensemble d'agents, situés dans un certain environnement et interagissant selon certaines relations (Ferber 1995). Un agent est une entité caractérisée par le fait qu'elle est, au moins partiellement, autonome. Des applications existent en physique des particules (agent = particule élémentaire), en chimie (agent = molécule), en biologie cellulaire (agent = cellule), en éthologie (agent = animal), en sociologie,

en ethnologie (agent = être humain). L'autonomie permet ici de simuler le comportement exact d'une entité. En archéologie, l'agent peut être un individu, un groupe humain, un habitat, un village, une ville, un territoire, un état, etc.

Les agents doivent être dotés:

- de systèmes de décisions et de planification à plusieurs;
- d'un modèle cognitif;
- d'un système de communication.

L'implémentation effective du système multi-agents s'effectue en utilisant une plate-forme de développement dont il existe aujourd'hui de nombreux modèles (Jade, Omas, Spade, Cormas, Netlogo, Turtlekit, Repast, Swarm, etc.).

Précurseur, J. Doran (1982) a appliqué la modélisation par les systèmes multi agents à plusieurs problématiques archéologiques comme l'organisation sociale des chasseurs-cueilleurs d'Aquitaine au Paléolithique supérieur (EOS project), la modélisation des systèmes de production et de commerce, des systèmes socioculturels et le changement culturel comme l'effondrement de la civilisation maya (Nigel, Doran 1994).

Le projet EOS (Doran *et al.* 1994) cherche à mettre en évidence un processus de hiérarchisation des groupes de chasseurs cueilleurs dans le Magdalénien du Périgord, sur la base d'un modèle de hiérarchisation proposé par Mellars. Dans cette simulation, les agents sont supposés capables de prise de décision rationnelle individuelle, de planification et de coopération dans le cadre de la collecte de ressources. Ils communiquent entre eux; leur planification est rudimentaire; les agents peuvent soit acquérir les ressources eux-mêmes soit élaborer des plans intégrant d'autres agents pour les acquérir collectivement. Les plans mis en œuvre sélectionnent les ressources à acquérir, choisissent les agents pour ce travail, estiment les résultats espérés et les planifient, négocient le plan avec les autres agents et sélectionnent le plan qui a la meilleure efficacité. Les résultats de la simulation sont les suivants: certains agents adoptent de façon répétitive les plans proposés par d'autres agents et sont amenés à se comporter comme des suiveurs. Dans le cas de ressources alimentaires très distribuées, travailler seul est plus efficace; dans le cas de concentrations de ressources, l'action groupée et organisée est plus efficace; quand les concentrations d'agents font face à des ressources insuffisantes, elles se défont. Si elles persistent, les chances de survie sont plus faibles que si elles se sont défaites.

Cette simulation multi-agents n'aboutit pas à démontrer une quelconque hiérarchie dans les groupes. Elle retrouve la capacité intragroupe et intergroupe à collaborer pour des tâches de chasses collectives saisonnières aux troupeaux de bison et de renne puis à se séparer. La hiérarchie dans les groupes de chasseurs cueilleurs n'apparaît que dans des cas très rares et sédentaires (Kelly 2007, chapitre 8) à l'Holocène chez les populations de chasseurs-pêcheurs-cueilleurs du Nord de la côte Ouest du continent

Le lecteur trouvera dans Kohler et Gumerman 2000 et dans Kohler et Van der Leew 2007 plusieurs exemples d’application de la modélisation des systèmes multi-agents en archéologie.

La simulation multi-agents du peuplement Anasazi dans la Long House Valley en Arizona entre 800 and 1350 AD (Dean *et al.* 2000; Axtell *et al.* 2002; Janssen 2009) est devenu un grand classique de référence, même exploité par Diamond (2006).

Dans la dernière publication qui a vérifié les résultats des travaux précédents (Janssen 2009), les agents sont les habitations, où sont supposés vivre 5 individus. Le territoire est structuré en 80×120 champs de taille 100×100 m<sup>2</sup>, qui se différencient par des indices de qualité du sol et de sécheresse. La séquence suivante de calculs est effectuée pour chaque année:

- 1) Calculer la récolte de chaque habitation (minimum 800 kg/an);
- 2) Si un agent ne produit pas suffisamment de nourriture à partir de la récolte et du stockage ou si l’âge est au-delà de l’âge maximum du ménage (30 ans) alors l’agent est retiré du système;
- 3) Calculer la récolte estimée pour l’année suivante à partir du maïs en stock et de la récolte réelle de l’année en cours;
- 4) Les agents qui pensent ne pas produire la quantité nécessaire de nourriture pour l’année suivante seront déplacés vers un nouvel emplacement cultivable et un endroit pour s’établir à proximité (maximum 1600 m);
- 5) Si un ménage est plus vieux que l’âge minimum de fertilité (16-30 ans), un nouveau ménage est généré, qui recevra en dotation une fraction du stock de maïs (0.33 kg);
- 6) Mettre à jour les sources d’eau à partir des données d’entrée;
- 7) L’âge de chaque agent ou ménage est incrémenté d’un an.

L’application travaille essentiellement sur une simulation des processus liés à la *carrying capacity*, et ne prend en compte aucun processus social (entraide, parenté, etc.).

Les différents auteurs concluent que l’environnement ne peut pas expliquer à lui seul l’abandon soudain du peuplement de la vallée à partir de 1300 AD (Figs. 1-2).

T. Kohler (Kohler *et al.* 2007) a appliqué la modélisation multi-agents à l’étude “éco-dynamique” des peuplements pueblos de la région centrale de Mesa Verde (Village Ecodynamics Project) entre 600 et 1300 apr. J.-C.

Le projet VEP 1 (2002-2008) a concerné 3176 sites pueblos datés par dendrochronologie dont 2220 à unique habitation, 850 entre 2 et 8 habitations, et 106 entre 9 et 134 habitations (villages) et sur une zone de 1827 km<sup>2</sup>, avec 45400 parcelles de 4 ha. Le peuplement pueblo est caractérisé par deux cycles, le premier de 600 à 900 marqué par une activité basée sur la chasse au cerf et au dindon, suivi d’une crise, puis un second cycle jusqu’à 1200 marqué

1

2

Figs. 1-2 - 1. Evolution du peuplement Anasazi (Axtell *et al.* 2002); 2. Evolution du peuplement Anasazi (Janssen 2009).

par la culture du maïs et la domestication du dindon. Les raisons de l'abandon vers 1200 n'est pas expliquée et plusieurs hypothèses ont été évoquées: baisse de productivité agricole lié à un changement climatique, attraction pour une meilleure région ou conflit. Les processus modélisés par la simulation multi-agents concernent les changements climatiques, l'économie de production (chasse, culture du maïs, domestication), la *carrying capacity*, la croissance démographique et du nombre d'habitats et l'évolution de la végétation. Ce sont des processus économiques et environnementaux.

Le projet VEP2 (2009-2013) met en jeu de nouveaux processus intégrant cette fois des processus SHS: les mécanismes d'échanges entre agents (échange réciproque de nourriture), la domestication du dindon, la spécialisation des tâches en relation avec le troc, et la hiérarchisation de la société implémentant un modèle à 11 agents (Hooper *et al.* 2010). Les résultats du projet VEP2 ne sont encore connus que partiellement (Kohler *et al.* sous presse) mais il est possible de considérer que les premiers processus sont plus des processus économiques (lissage des surplus et réciprocité; domestication du dindon grâce à la surproduction de maïs; spécialisation des tâches entre agents – ou répartition des tâches au sein de l'agent? – et troc). Le processus de hiérarchisation est en fait un processus de gouvernance, dont le développement est lié à la création de villages.

Tony Wilkinson (Université de Chicago) a développé le projet Enkimdu du nom de l'ancien Dieu sumérien de l'agriculture et l'irrigation pour modéliser les processus naturels (météo, croissance des cultures, hydrologie, évolution des sols, la dynamique des populations, etc.) et les processus économiques et sociétaux (pratiques de l'agriculture et de l'élevage, comportements axés sur la parenté, commerce, etc.) interagissant quotidiennement à travers des séries décennales sur plusieurs générations. Les agents sont des individus et des habitations, des champs cultivés ou mis en jachère et des troupeaux. La

modélisation permet de simuler la tendance démographique du système agropastoral (Wilkinson *et al.* 2007).

### 3. Les processus d'adaptation à l'environnement

Dans la modélisation des systèmes multi-agents, le paradigme écologiste et malthusien, largement diffusé dans le grand public par Jared Diamond (2006) met en œuvre prioritairement et parfois essentiellement des mécanismes d'adaptation à l'environnement, qu'ils soient indépendants de l'activité humaine comme:

- Changements de température;
- Changements de pluviosité;
- Catastrophes naturelles;

ou le résultat d'une activité humaine mal contrôlée et parfois irréversible entraînant le changement du paysage et des biocénoses:

- Changements de rendement agricole;
- Développement de la domestication animale et éradication des animaux sauvages;
- Epuisement des sols;
- Erosion des sols;
- Réduction de la végétation;
- Modification de l'écosystème;
- Epidémies humaines, animales et végétales;
- Etc.

Ces approches ont largement utilisé l'abondance des données d'activités alimentaires (archéozoologie, archéobotanique) et de reconstitution de l'environnement (dendrologie, palynologie, malacologie, etc.) que fournit l'archéologie.

Dans ce contexte, deux attitudes sont possibles:

- Les sociétés humaines doivent s'adapter à un environnement qu'elles peuvent dégrader, et en corollaire, seules celles qui ont pu s'adapter ont survécu;
- Les sociétés humaines, malgré un environnement défavorable, ont réussi à trouver en eux-mêmes les forces intérieures et les solutions nécessaires pour survivre, par différents moyens comme la modification de leurs organisations sociales, l'adoption d'innovations techniques ou le changement de leur système de croyances.

Plus généralement, c'est l'ensemble des deux approches qu'il faudra considérer dans une modélisation par les systèmes multi-agents. L'analyse critique des applications actuelles révèle que la première approche est favorisée soit pour des raisons paradigmatiques (lié à l'Ecologie politique et au développe-

ment durable), soit pour des raisons pratiques, les processus d'adaptation à l'environnement étant plus facilement mesurables et formalisables dans une modélisation par les systèmes multi-agents.

Dans les exemples cités précédemment, les projets sur les peuplements Anasazi du Colorado et Pueblo d'Arizona appartiennent à cette catégorie. Néanmoins, le projet VEP2 introduit significativement des processus de gouvernance et de règles sociales inter-habitations. Les deux projets échouent cependant à trouver l'explication de l'effondrement de ces deux peuplements.

#### 4. Processus d'activités associés à des systèmes archéologiques

La modélisation systémique d'une société est une formalisation difficile, car elle doit prendre en compte des sous-systèmes et des processus qui à la fois jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement d'une société et qui sont mesurables dans le sens des informations qui sont enregistrées ou enregistrables par l'approche archéologique et épigraphique (Djindjian 2011, §4.3). Certains de ces processus sont de mieux en mieux connus tandis que d'autres ne sont qu'esquissés. Certains ne sont connus que par des textes ou des inscriptions, et ont pu faire l'objet d'une réécriture du passé que nous enregistrons comme une vérité historique. D'autres ne nous sont suggérés que par le comparatisme ethnographique et l'anthropologie culturelle et nous en séparent le plus souvent par des milliers d'années et de kilomètres de distance.

Les processus de fabrication ou systèmes techniques, qui concernent aussi bien les ustensiles, les outils, les armes, les bijoux, les machines, les bâtis, les infrastructures (irrigation, transport, aménagement du paysage, urbanisation, etc.) nous sont accessibles à partir des vestiges de la culture matérielle quand ceux-ci sont conservés.

La mise en contexte socio-économique de ces objets permet de reconstituer les processus économiques (production et commerce) dans leur organisation sociale (production familiale, artisanat, production industrielle), spatiale (diffusion des matériaux et objets manufacturés) et commerciale (troc, commerce).

L'alimentation des sociétés humaines et de leurs animaux domestiques est le domaine d'étude des processus de gestion des ressources alimentaires, reconstituant les systèmes de chasseurs-cueilleurs-pêcheurs comme les systèmes agro-pastoraux et leurs nombreuses révolutions techniques.

La relation de la société avec son espace de vie conduit à l'étude des processus d'occupation du territoire, de l'implantation des sites d'habitat, de leur distribution spatiale, de leur spécialisation fonctionnelle, de leurs interrelations, de leur hiérarchisation entraînant l'urbanisation du territoire puis son étatisation. Ces études mettent en évidence la dimension fractale de l'organisation spatiale de l'activité humaine et l'importance des mécanismes d'auto-organisation.

La méthode archéologique sait prendre en compte ces processus car il est possible de reconstituer les activités à partir des artefacts fossilisés et de mettre en relation les activités entre elles, permettant de reconstituer des sous-systèmes. Les agents sont alors soit des artefacts (habitations, parcelles cultivées, etc.) soit des acteurs (individus, groupes humains, maisonnées, etc.) liés à ces activités.

## 5. Processus SHS en archéologie

Il n'en est pas de même pour les processus des Sciences Humaines et Sociales (SHS) que la méthode archéologique peine encore aujourd'hui à reconstituer à partir des données qu'elle enregistre et des processus qu'elle étudie.

### 5.1 *Processus d'organisation sociale*

Sous l'influence de l'anthropologie sociale et culturelle, certains processus ont été modélisés par des systèmes multi-agents comme :

- Les systèmes de parenté (Read 1998);
- Les échanges réciproques (Kohler *et al.* sous presse);
- La “hiérarchisation” de la société (Doran *et al.* 1994; Kohler *et al.* 2012b);
- La spécialisation des tâches.

Les systèmes multi-agents permettent d'organiser les agents suivant les grandes catégories d'organisation sociale connues, comme par exemple :

- Parenté;
- Hiérarchies;
- Holarchies (hiérarchies sans relation d'autorité) comme des structures spatiales (habitations, villages, parcelles cultivées, territoires, etc.);
- Coalitions (regroupements opportunistes ponctuels de groupes de chasseurs-cueilleurs);
- Coopérations (travaux communs: infrastructure agricole, irrigation, défense de l'habitat, etc.);
- Congrégations (groupes);
- Sociétés (ensemble d'agents possédant des règles communes);
- Fédérations (ensemble des sociétés avec un représentant);
- Marchés (relation offre/demande avec ou sans moyens de paiement);
- Echanges (échanges réciproques à différents niveaux: intra-habitation, inter-habitation, intra-famille élargie, intra-groupe, intergroupe, etc.);
- Matrices (organisation matricielle);
- Compositions (mélanges des organisations précédentes).

Figs. 3-4 – 3. Simulation du nombre moyen d'habitations avec un modèle hiérarchique (H) et non-hiérarchique avec apprentissage social (SL) ou sans (NSL) (Kohler *et al.* 2012b); 4. Processus concernés par la simulation globale d'une "artificial society".

## 5.2 *Processus de gouvernance*

Les simulations multi-objets ont traités jusqu'à présent des modèles de chasseurs-cueilleurs et des modèles agro-pastoraux du Néolithique et de l'âge du Bronze, en y incluant des processus de hiérarchisation et de leadership. La question des semi-états et des états n'a pas encore été abordée.

## 5.3 *Processus d'attitudes sociétales*

Les simulations multi-objets n'ont pas traité l'introduction de processus d'attitudes sociétales, sauf la notion d'apprentissage social (Kohler *et al.* 2012b) (Fig. 3) ou d'émulation inter-individus (Reynolds *et al.* 2001).

## 5.4 *Processus de sacralisation de la société (religion, croyances populaires)*

Les simulations multi-objets n'ont pas traité l'introduction de processus de sacralisation de la société.

## 6. Processus d'organisation sociale: vers un modèle systémique

Les organisations sociales des sociétés que les archéologues étudient sont toujours basées sur des modèles anthropologiques paradigmatiques proposés par les évolutionnistes du XIX<sup>e</sup> siècle (Moran, Spencer, Engels), les fonctionnalistes du XX<sup>e</sup> siècle (Malinowski, Evans-Pritchard, Fortes), les processualistes (Gluckman, Leach, Balandier, Bastide), les néo-évolutionnis-

tes (Steward, White, Fried, Service, Sahlins, Southall) ou les néo-marxistes (Meillassoux, Godelier). Ils semblent néanmoins tous se reconnaître dans la distinction minimale Bande/Tribu/Chefferie/Etat même si elle ne représente qu’une “forme” sociale et non un stade d’évolution sociale.

Dans l’approche systémique de la modélisation multi-agents, les modèles anthropologie classique montrent cependant leurs limites:

- Organisation familiale: nucléaire, élargie, punaluana, etc.;
- Systèmes de lignages: parenté, clan, lignées;
- Organisation corporatiste: commerce, classes, castes;
- Organisation territoriale: bande, tribu, chefferie, micro-état.

Ces limites bloquent le développement de simulation multi-agents intégrant des processus d’organisation sociale.

L’approche de Testart (2005), bien qu’elle soit encore embryonnaire, marque une rupture par rapport aux modèles précédents, par sa structure systémique:

- Sociétés sans stockage:
  - Service pour la fiancée (Inuit);
  - Echange de sœurs;
  - Obligations viagères (aborigènes australiens);
- Sociétés ploutocratiques à ostentation (avec stockage):
  - Echanges ou paiements (avec ou sans esclavage);
  - Dons et contre-dons;
- Semi-états:
  - Lignagère (liens familiaux);
  - Villageoise (proximité de lieu de vie);
  - Classes d’âge (âge et expérience);
  - Démocratie primitive;
- Etats:
  - Royautés;
  - Sociétés de classes:
    - Propriété de la terre;
    - Propriété de capitaux;
    - Propriété de réseaux commerciaux.

C’est dans ce contexte systémique et lui seul que plusieurs processus liés à des règles sociales pourraient prendre leur sens: systèmes de parentés (Lévi-Strauss, Radcliffe-Brown, Morgan, etc.), pratiques du don et du contre-don (Boas, Malinowski, Mauss, Testart), dot et prix de la fiancée, tabous, interdits alimentaires, rites de purification, règles de compensation, éducation, fêtes (les Travaux et les Jours), distribution des tâches (genre), etc.

## 7. Processus d'organisation spatiale

L'organisation spatiale d'un peuplement dans son territoire possède naturellement plusieurs types de structures:

- Des structures de localisation des habitats, des zones de ressources alimentaires (sites de chasse, zones de cueillette, parcelles cultivées, aires de broutage) et des sites de ressources de matière première, d'eau et d'énergie;
- Des structures d'influence réciproque des sites (comme par exemple celles mises en œuvre par des modèles de gravité au sens large) ou de non-influence (phénomènes de frontières);
- Des structures fractales liées au développement à plusieurs niveaux d'échelle (loi de Zipf-Mandelbrot et dérivées);
- Des structures liées à l'urbanisation incluant la spécialisation partielle ou totale des fonctions des sites urbains: administrative, commerciale (bourg, foire, comptoir), industrielle et transport, depuis la théorie de la place centrale jusqu'à plus récemment le projet ISCOM (Lane *et al.* 2009);
- Des structures en réseau liées des fonctions commerciales, défensives et de communications caractérisées par des nœuds (étapes, forts sémaphores), des flux (objets, forces, informations) et des voies fluviales, maritimes, terrestres et aériennes: *social network analysis*, centralité d'interposition et autres techniques de centralité (Wasserman, Faust 1994; White, Spufford 2005);
- Des structures de résiliences, liées à la perdurance et à la réutilisation dans le territoire d'anciens sites et paysages (analyse de la résilience - Holling 1978 - chrono-chorématique urbaine).

De nombreux processus possèdent cette composante spatiale: gestion du territoire des groupes de chasseurs-cueilleurs, construction du paysage agro-pastoral, industrialisation, urbanisation, étatisation, qui évoluent dans le temps en passant par des phases de création, développement, stagnation, récession, adaptation.

L'intérêt d'intégrer les structures spatiales précédentes dans une simulation multi-agents est évident et les premières applications en archéologie verront probablement le jour dans les toutes prochaines années.

## 8. Processus d'attitudes sociétales (exemples)

Les attitudes sociétales d'un individu, d'un groupe comme d'une communauté jouent un rôle essentiel dans la capacité de modifier les organisations et les règles sociales pour faire face à la nécessité d'une adaptation, de la réaction à un danger ou d'un changement critique. Dans les sociétés du passé, ces attitudes sont inévitablement liées aux croyances et aux religions, et font partie de l'éducation transmise aux enfants.

Il n'est pas possible de faire une liste exhaustive de ces attitudes et nous nous limiterons ici à illustrer par quelques exemples des attitudes opposées:

Confiance dans le futur	Investissement/thésaurisation
Innovation/progrès	confiance/crainte
Savoirs/connaissances	soif/refus
Solidarité	entraide/égoïsme
Respect des règles	soumission/transgression
Relation avec l'autre (dans le groupe)	empathie/repli sur soi
Relation avec l'autre (hors du groupe)	exclusion/indifférence/cohabitation
Réaction aux difficultés	pragmatisme/idéalisme
Réaction aux responsabilités collectives	engagement/évitement
Genre	égalité/hierarchie, partage/séparation tâches
Réaction aux “informations”	émotivité/passivité
Religion	exotérisme/ésotérisme
Tradition	respect/adaptation

Ainsi des attitudes concernant la famille, le travail, la santé, le temps, la mort vont avoir au niveau de la communauté une influence considérable dans le succès ou l'échec d'un changement que le contexte extérieur ou l'évolution intérieure rend obligatoire.

## 9. Tocqueville et la révolution française de 1789

L'analyse d'Alexis de Tocqueville (Tocqueville 2004) sur les causes de la révolution française, illustre bien les propos précédents. Bien que les hypothèses suivantes puissent être caricaturales dans leur résumé, elles mettent en évidence la pluralité des processus en jeu:

1. L'explosion du volcan Laki en Islande (1783-85) à l'origine d'un climat pourri, de mauvaises récoltes, d'une spéculation sur la farine de blé, d'une disette à l'origine d'émeutes populaires;
2. Une gouvernance faible (Louis XVI);
3. Une société bloquée sans courage de réformes (Turgot);
4. Une banqueroute suite à l'accumulation des dettes (Necker) entraînant la convocation des Etats Généraux en janvier 1789;
5. Les attitudes du peuple français (souci d'égalité pour les uns, refus d'abandonner des privilèges pour d'autres, envie d'être rentier pour les possédants, etc.).

## 10. Conclusions

Il est aisé de constater dans l'exemple sur les causes de la révolution française de 1789, l'influence de plusieurs processus: économique, environ-

nemental, organisationnelle, gouvernance et sociétal, qui vont intervenir conjointement pour déclencher la révolution. Il en est probablement de même pour toutes les applications de ce qui est désigné par les mots à la mode aujourd'hui: *archaeology of siconatural systems* qui a remplacé l'*archaeology of sociocultural systems* des années 1970-80 ou même encore plus globalement la formule marketing *artificial societies*, qui résonne si bien avec la *virtual archaeology*.

Le tableau de la Fig. 4 illustre l'importance du nombre de processus induits par la simulation globale d'une société, et les progrès restant à accomplir pour la modéliser. Le projet est-il utopique? Les systèmes multi-agents sont-ils les systèmes experts (Gardin 1987) des années 2000/2010? Faut-il les restreindre à l'étude des changements culturels où connaissant A (société avant le changement) et B (société après le changement), les processus et les données responsables d'une transition réussie peuvent être plus facilement mis en évidence? Et est-on sûr qu'en simulant un modèle de A, la méthode possède la potentialité de nous donner toutes les changements de A y compris son éventuel effondrement? Pour répondre à la question, le plus simple moyen est que les archéologues s'y mettent!

François Djindjian  
Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne  
CNRS UMR 7041 ArScAn, Nanterre

## BIBLIOGRAPHIE

- Altaweel M. 2006, *Addressing the Structures and Dynamics of Modeled Human Ecologies*, in J. Clark, J. Hagemester (eds.), *Digital Discovery: Exploring New Frontiers in Human Heritage [CAA 2006. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology]*, Budapest, Archaeolingua, 30-41.
- Ammermann A.J., Cavalli-Sforza L.L. 1984, *The Neolithic Transition and the Genetics of Populations in Europe*, Princeton, Princeton University Press.
- Axtell R.L., Epstein J.M., Dean J.S., Gumerman G.J., Swedlund A.C., Harburger J., Chakravarty S., Hammond R., Parker J., Parker M. 2002, *Population Growth and Collapse in a Multi-Agent Model of the Kayenta Anasazi in Long House Valley*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(3), 7275-7279.
- Beekman C.S., Baden W.W. (eds.) 2005, *Nonlinear Models for Archaeology and Anthropology, Continuing the Revolution*, Hampshire-Burlington, Ashgate.
- Bentley R., Maschner A., Herbert D.G. 2003, *Complex Systems and Archaeology, Empirical and Theoretical Applications*, Foundations of Archaeological Inquiry, Salt Lake City, University of Utah Press.
- Black S. 1978, *Polynesian outliers: a study in the survival of small populations*, in I. Hodder (ed.), *Simulation Studies in Archaeology*, Cambridge, Cambridge University Press, 63-76.
- Brantingham J. 2003, *A Neutral Model of Stone Raw Material Procurement*, «American Antiquity», 68(3), 487-509.
- Brown C.T., Witschey W.R.J., Liebovitch L.S. 2005, *The broken past: Fractals in Archaeology*, «Journal of Archaeological Methods and Theory», 12(1), 37-78.
- Costopoulos A., Lake M. 2010, *Simulating Change, Archaeology into the Twenty-First Century*, Foundations of Archaeological Inquiry, Salt Lake City, The University of Utah Press.

- Dean J.S., Gummerman G.J., Epstein J.M., Axtell R.L., Swedlund A.C., Parker M.T., McCarroll S. 2000, *Understanding Anasazi Culture Change Through Agent-Based Modeling*, in A. Timothy Kohler, G.J. Gummerman (eds.), *Dynamics in Human and Primate Societies, Agent-Based Modeling of Social and Spatial Processes*, New York-Oxford, Oxford University Press, 179-207.
- Diamond J. 2006, *Effondrement*, Paris, Gallimard.
- Djindjian F. 2011, *Manuel d'Archéologie*, Paris, Armand Colin.
- Doran J. 1982, *A Computational model of sociocultural systems and their dynamics*, in C. Renfrew, M.J. Rowlands, B. Abbott Segraves (eds.), *Theory and Explanation in Archaeology*, New York, Academic Press, 375-388.
- Doran J.E. 1990, *Computer-based simulation and formal modeling in Archaeology: a review*, in A. Voorrips (ed.), *Mathematics and Information Science in Archaeology: A Flexible Framework*, Studies in Modern Archaeology, 3, Bonn, Holos, 93-114.
- Doran J., Palmer M., Gilbert N., Mellars P. 1994, *The EOS Project: Modeling Upper Palaeolithic Social Change*, in N. Gilbert, J. Doran (eds.), *Artificial Societies*, London, UCL Press, 195-221.
- Epstein J.M., Axtell R. 1996, *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom-up*, Washington DC-Cambridge, The Brookings Institution Press and MIT Press.
- Ferber J. 1995, *Les Systèmes multi-agents: vers une intelligence collective*, InterEditions.
- Forrester J.W. 1968, *Principles of Systems*, Cambridge, Wright Allen Press.
- Forrester J.W. 1969, *Urban Dynamics*, Cambridge, MIT Press.
- Forrester J.W. 1970, *World Dynamics*, Cambridge, Wright Allen Press.
- Gardin J.-Cl. (ed.) 1987, *Systèmes experts et Sciences humaines: le cas de l'archéologie*, Paris, Eyrolles.
- Gilbert N. 2008, *Agent-Based Models, Quantitative Applications in the Social Sciences*, 153, Sage Publications, Thousand Oaks, CA.
- Gilbert N., Doran J. 1994, *Artificial Societies: The Computer Simulation of Social Phenomena*, London, UCL Press.
- Gilbert N., Troitzsch K.G. 2009, *Simulation for the Social Scientist*, Berkshire, Open University Press.
- Graham S. 2009, *Behavior Space: Simulating Roman Social Life and Civil Violence*, «Digital Studies/Le champ numérique», 1, n. 2 ([http://www.digitalstudies.org/ojs/index.php/digital\\_studies/article/view/172/214](http://www.digitalstudies.org/ojs/index.php/digital_studies/article/view/172/214)).
- Griffin A.F., Stanish C. 2007, *An Agent-based Model of Prehistoric Settlement Patterns and Political Consolidation in the Lake Titicaca, Basin of Peru and Bolivia, Structure and Dynamics*, «Journal of Anthropological and Related Sciences», 2(2) (<http://www.escholarship.org/uc/item/2zd1t887>).
- Holling C.S. (ed.) 1978, *Adaptive Environmental Assessment and Management*, London, John Wiley & Sons.
- Hooper P.L., Kaplan H.S., Boone J.L. 2010, *A theory of leadership in human cooperative groups*, «Journal of Theoretical Biology», 265, 633–646.
- Janssen M.A. 2009, *Understanding Artificial Anasazi*, «Journal of Artificial Societies and Social Simulation», 12(4)13 (<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/13.html>).
- Kelly R.L. (2007), *The Foraging Spectrum. Diversity in Hunter-Gatherer lifeways*, New-York, Percheron Press.
- Kohler T.A., Gummerman G.J. 2000, *Dynamics in Human and Primate Societies, Agent-Based Modeling of Social and Spatial Processes*, New York-Oxford, Oxford University Press.
- Kohler T.A., Bocinsky R.K., Cockburn D., Crabtree S.A., Varien M.V., Kolm K.E., Smith Sc., Ortman S.G., Kobti Z. (sous presse), *Modelling prehispanic pueblo societies in their ecosystems*, «Ecological Modelling», 2012, doi:10.1016/j.ecolmodel.2012.01.002.
- Kohler T.A., Cockburn D., Hooper P.L., Bocinsky R.K., Kobti, Z. 2012b, *The coevolution of group size and leadership: an agent-based public goods model for prehispanic pueblo societies*, «Advances in Complex Systems», 15, Nos. 1&2, doi: 10.1142/S0219525911003256
- Kohler T.A., van der Leeuw S.E. 2007, *The Model-Based Archaeology of Socio-natural Systems*, Santa Fe, School for Advance Research Press.
- Kohler T.A., Varien M.D. (eds.) 2012a, *Emergence and Collapse of Early Villages: Models of Central Mesa Verde Archaeology*, University of California Press, Berkeley.
- Kowarik K., Reschreiter H., Wurzer G. 2010, *Modeling a mine, Agent based Modeling, System dynamics and Experimental Archaeology applied to the Bronze Age Salt mines of Hallstatt*, in *Mining in European History and its Impact on Environment and Human Societies, Proceedings of the*

- 1<sup>st</sup> Mining in European History-Conference of the SFB-HIMAT (Innsbruck 2009), University Press, 199-208.
- Lake M.W. 2000, *MAGICAL Computer Simulation of Mesolithic Foraging*, in T.A. Kohler, G.J. Gummerman (eds.), *Dynamics in Human and Primate Societies: Agent-Based Modelling of Social and Spatial Processes*, Oxford, Oxford University Press, 107-143.
- Lane D., Pumain D., van der Leeuw S.E., West G. (eds.) 2009, *Complexity Perspectives in Innovation and Social Change (Methods Series)*, Berlin, Springer-Verlag.
- Li T.Y., Yorke J.A. 1975, *Period three implies chaos*, «American Mathematical Monthly», 82, 985-992.
- Liao T.F. 2008, *Series Editors, Introduction*, in N. Gilbert, *Agent-Based Models, Quantitative Applications in the Social Sciences*, 153, IX-X.
- Lowe J.W.G. 1985, *The Dynamics of Apocalypse: A System Simulation of the Classic Maya Collapse*, Albuquerque, The University of New Mexico Press.
- Macarthur N., Saunders I.W., Tweedie R.L. 1976, *Small population isolates: a micro-simulation study*, «Journal of the Polynesian Society», 85, 307-326.
- McGlade J., Allen P.M. 1986, *Fluctuation, instability and stress: understanding the evolution of a Swidden horticultural system*, «Science and archaeology», 28, 44-50.
- Mithen S.J., Reed M. 2002, *Stepping Out: A Computer Simulation of Hominid Dispersal from Africa*, «Journal of Human Evolution», 43, 433-462.
- Mandelbrot B.B. 1983, *The Fractal Geometry of Nature*, New York, Freeman and Co.
- Martin J.F. 1972, *On the estimation of the sizes of local groups in a hunting-gathering environment*, «American anthropologist», 75, 1448-1468.
- Nigel G., Doran J., (eds.) 1994, *Simulating Societies: The Computer Simulation of Social Phenomena*, London, UCL Press.
- Nottale L., Chaline J., Grou P. 2000, *Les arbres de l'évolution*, Paris, Hachette.
- O'Shea J.M. 1978, *A Simulation of Pawnee site development*, in I. Hodder (ed.), *Simulation Studies in Archaeology*, Cambridge, Cambridge University Press, 39-40.
- Premo L.S. 2005, *Patchiness and Prosociality: An Agent-based Model of Plio/Pleistocene Hominid Food Sharing*, in P. Davidsson, K. Takadama, B. Logan, *Multi-Agent and Multi-Agent-Based Simulation, Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 3415, Berlin, Springer, 210-224.
- Premo L.S. 2008, *Exploring behavioral terra incognita with archaeological agent-based models*, in B. Frischer, A. Dakouri-Hild (eds.), *Beyond Illustration: 2D and 3D Technologies as Tools of Discovery in Archaeology*, BAR International Series 1805, Oxford, ArchaeoPress, 46-56.
- Prigogine I. 1968, *Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles*, Paris, Dunod.
- Read D.W. 1998, *Kinship based demographic simulation of societal processes*, «Journal of Artificial Societies and Social Simulation», 1 (<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/1/1/1.html>).
- Renfrew C. 1978, *Trajectory discontinuity and morphogenesis: the implication of catastrophe theory for archaeology*, «American Antiquity», 43, 203-222.
- Renfrew C., Cooke K.L. (ed.) 1979, *Transformations: Mathematical Approaches to Culture Change*, New York, Academic Press.
- Reynolds R.G. 1986, *An adaptative computer model for the evolution of plant collecting and early agriculture in the eastern valley of Oaxaca*, in K.V. Flannery (ed.), *Guila Naquitz: Archaic Foraging and Early Agriculture in Oaxaca, Mexico*, Orlando, Academic Press, 439-500.
- Reynolds R., Whallon R., Goodhall S. 2001, *Transmission of Cultural Traits by Emulation: An Agent-Based Model of Group Foraging Behavior*, «Journal of Memetics - Evolutionary Models of Information Transmission», 4 ([http://jomemmit.cfpm.org/2001/vol4/reynolds\\_r&a.html](http://jomemmit.cfpm.org/2001/vol4/reynolds_r&a.html)).
- Tainter J.A. 1988, *Collapse of Complex Societies*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Testart A. 2005, *Éléments de classification des sociétés*, Paris, Errance.
- Thom R. 1972, *Modèles mathématiques de la morphogénèse*, Paris, Bourgeois.
- Thomas D.H. 1972, *A Computer simulation model of Great Basin Shoshonean subsistence and settlement patterns*, in D.L. Clarke (ed.), *Models in Archaeology*, London, Methuen, 671-704.
- Tocqueville A. (de) 2004, *État social et politique de la France avant et depuis 1789*, dans *Œuvres*, t. III, Paris, Gallimard.
- Van der Leeuw S., McGlade J. (eds.) 1997, *Archaeology: Time, Process and Structural Transformations*, London, Routledge.

- Ward R.H., Weiss' K.M. 1976, *The Demographic Evolution of Human Populations*, London, Academic Press.
- Wasserman S., Faust K. 1994, *Social Network Analysis: Methods and Applications*, New York, Cambridge University Press.
- White D.R., Spufford P. 2005, *Medieval to Modern: Civilizations as Dynamic Networks*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Wilkinson T.J., Christiansen J.H., Ur J., Widell M., Altaweel M. 2007, *Modeling Settlement Systems in a Dynamic Environment, Case Studies from Mesopotamia*, in T. A. Kohler, E.S. van der Leeuw (eds.), *The Model-Based Archaeology of Socio-natural Systems*, Santa Fe, School for Advance Research Press, 175-208.
- Wobst H.M. 1974, *Boundary conditions for Palaeolithic social systems: a simulation approach*, «American Antiquity», 39, 2, 147-170.
- Woolridge M., Jennings N. 1995, *Intelligent Agents: Theory and Practice*, «The Knowledge Engineering Review», 10(2), 115-152.
- Zubrow E.B.W. 1975, *Prehistoric Carrying Capacity: A Model*, Menlo Park, California, Cummings.

## ABSTRACT

The attempts to model past societies by the latest techniques, such as multi-agent systems, are limited by the difficulties in modeling the processes of Human and Social Sciences: social organization, social rules, management, societal attitudes. While addressing this problem, the archaeologist is often led to select the climatic change and the economic processes, which are easier to quantify and model and therefore to find only “eco-systemic” explanations for changes in societies. We are here trying to initiate work on the modeling of such processes, the foundations of which are found in the work of earlier authors (history, anthropology, sociology).

## EXPÉRIENCE DE RELEVÉ PAR PHOTOGRAMMÉTRIE EN ARCHÉOLOGIE PRÉVENTIVE

### 1. Introduction

Les opérations d'archéologie préventive se réalisent dans des délais réduits, avec des surfaces ou des volumes importants et dans des contextes météorologiques variés. De plus, la pénibilité du travail a des conséquences évidentes sur la santé des archéologues. Toutes ces conditions mettent à l'épreuve nos pratiques et nous poussent à envisager de nouvelles techniques dans le but d'optimiser notre activité.

Notre expérience au sein de l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap), en tant que topographes ou dessinateurs, nous a amenés à remettre en question le travail de relevé et à trouver des méthodes plus efficaces pour le relevé des structures complexes.

Depuis une dizaine d'années, le développement de l'informatique en archéologie permet d'envisager sous un nouveau jour les méthodes de relevé de terrain. En effet, l'acquisition tridimensionnelle, qui était une technologie réservée à des industries de haute précision, peut aujourd'hui être utilisée par des archéologues pour faire des captures de leur chantier.

Plusieurs solutions existent mais la complexité de la plupart des systèmes et leur coût d'exploitation réservent leur utilisation pour des sujets prestigieux. Toutes les découvertes ne le sont pas et ne justifient pas la mise en œuvre de moyens de relevé dispendieux. Cependant, la nécessité de précision pour des éléments archéologiques ne doit pas dépendre uniquement de l'intérêt muséographique ou de leur valeur comme support de communication.

À l'Inrap, quelques agents expérimentent l'acquisition en 3D afin d'évaluer l'intérêt pour une technique qui est en phase de démocratisation. L'expérience menée en Île-de-France nous a permis d'ouvrir le débat avec certains de nos collègues sur la nature, la fonction et la précision que devait avoir un relevé archéologique. Nous essayons aux travers d'exemples de terrain, de répondre aux questions ouvertes par ce sujet. Ainsi, nous présentons ici les raisons qui nous ont conduits à employer la photogrammétrie pour réaliser des relevés archéologiques et la façon dont ces travaux ont été intégrés dans l'ensemble des données.

### 2. Évaluer la méthode

Pour des raisons de protection de propriété des données et pour limiter le cout de cet exercice nous avons privilégié une solution logiciels open source.

Ainsi, sur les conseils d'archéotransfert<sup>1</sup> de Bordeaux, les logiciels libres Bundler<sup>2</sup>, PMVS, CMVS<sup>3</sup> et Meshlab<sup>4</sup> nous permettent depuis un an de réaliser des acquisitions 3D à haute densité de points.

L'un des premiers reproches faits à la photogrammétrie porte sur la précision des données enregistrées, sans toutefois remettre en question la précision du relevé traditionnel.

Mais les questions sous entendues et que nous devons nous poser sont les suivantes:

- Quelle est la précision et donc l'incertitude des mesures acceptable en archéologie?
- Est-ce que la photogrammétrie peut s'avérer aussi fiable qu'un relevé de terrain?

### 3. Tester la qualité des mesures

En débutant avec ce système, nous avons peu d'information sur la qualité des données générées par ces logiciels. Comme les autres outils de mesure, celui-ci a 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. Elles 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 est irréversible notamment en raison de l'action destructrice de la fouille.

Évaluer la qualité d'un outil est un préalable à une utilisation fonctionnelle de celui-ci. Cette expertise est d'autant plus importante pour l'utilisation de logiciels open source, que ceux qui ont été choisis n'ont pas fait l'objet d'évaluation métrologique poussée. À l'occasion de plusieurs essais, dans des contextes différents, d'acquisition 3D et de modélisation par ce moyen, les résultats semblaient satisfaisants. Les comparaisons faites avec des levés topographiques, bien que réalisés avec une finesse totalement différente, révélaient une bonne cohérence entre ces deux types de levés. Néanmoins, cette suite de logiciel développée librement n'apporte pas de garantie sur l'exactitude des résultats. De plus, face à de nombreuses critiques, il nous a semblé utile de mesurer par nos propres moyens les capacités de ce nouvel outil.

Nous avons établi un protocole de mesure basé sur l'analyse d'une des valeurs produites. La procédure choisie réduit les opérations de vérification faisant appel à des moyens de mesure physique limitant ainsi les erreurs dues

<sup>1</sup> Présentation de Pascal Morat d'Archéovision

<sup>2</sup> Logiciel écrit par Noah Snively (<http://phototour.cs.washington.edu/bundler/>)

<sup>3</sup> Logiciel écrit par Yasutaka Furukawa (<http://grail.cs.washington.edu/software/cmvs/>)

<sup>4</sup> Logiciel open source (<http://meshlab.sourceforge.net/>)

aux incertitudes de ceux-ci. Nous nous sommes astreints à comparer nos résultats avec une référence qui pouvait aisément être restituée de manière théorique. Cette façon de procéder ne nous permet pas de rattacher les erreurs et incertitudes mesurées à un élément du process plutôt qu'un autre, elles sont mesurées de façon globale. Toutefois, le protocole est répétable et offre la possibilité d'affiner les résultats du test.

Le choix de la référence est important, celle-ci doit être homogène et bien définie. Dans cette opération de mesure, il est préférable de disposer d'une référence dont le volume est simple et facilement contrôlable. En effet, une forme complexe nécessiterait d'effectuer des mesures de comparaison avec d'autres techniques. Dans ces conditions, les résultats du test devraient tenir compte des incertitudes du matériel de mesure, de l'opérateur et de la référence mesurée. Le degré de confiance que l'on peut avoir de la modélisation 3D par un procédé photogrammétrique peut se mesurer en calculant les capacités du système à restituer la planéité d'une surface. Ainsi, une surface restituée en 3D peut être contrôlée par une de ses dimensions si elle est positionnée parallèlement à un des trois plans de projection X, Y ou Z. Le modèle de 48 706 face a été aligné de façon à ce qu'il corresponde à une surface horizontale dont le niveau a été fixé à  $Z = 0$ .

Les calculs étant basés sur des photos, il est difficile de faire le rapport entre la résolution d'un cliché et la résolution du résultat. En effet, la surface couverte par chaque pixel est dépendante de la distance de l'appareil photo avec chaque partie du sujet. La déformation optique accentue d'autant plus ce phénomène que les photos sont prises de façon oblique. Toutefois, on peut établir une moyenne de ces valeurs sur la zone occupée par le sujet traité.

Au centre du modèle, d'une surface totale calculée de  $1,35 \text{ m}^2$ , les points générés par la photogrammétrie sont distribués selon un pas de 9 pixels par point calculé. On peut donc estimer que la résolution est de 9 fois la taille moyenne d'un pixel pris au même endroit sur plusieurs photos, soit dans ce cas une résolution de 1,5 mm.

Nous constatons à un niveau de confiance de 95,5% que les valeurs mesurées lors du test sont justes à  $\pm 0,3$  mm. La moyenne des valeurs des TIN (Triangular Irregular Network calculé à partir du nuage de points de haute densité) composant le maillage est proche de 0 en Z. Ainsi, leur altitude moyenne est de  $39 \times 10^{-5}$  mm. Dans ce cas, les valeurs mesurées donnent un résultat juste et fidèle par rapport à la référence théorique, supérieur à ce qui est accepté avec les méthodes courantes.

#### 4. Contrôle de la qualité par répétabilité des mesures

La modélisation du bloc de grès aménagé au Néolithique final découvert à Ballancourt-sur-Essonne a été une occasion supplémentaire d'évaluer la

qualité de la méthode. Le modèle final est le produit de deux calculs distincts basés sur deux groupes de prises de vue différents. Chaque MNS<sup>5</sup> couvre une des deux faces principales du bloc et ont en commun ses faces latérales. La superposition des aires communes aux deux modèles révèle la qualité de mesures réalisées avec une source d'information différente.

Pour cette vérification, deux zones superposables ont été extraites des modèles et alignées par trois points d'amères sur AutoCAD. Puis le document a été exporté sur ArcGis pour contrôler les écarts entre les deux MNS. La surface commune couvre 0,15 m<sup>2</sup> avec une déformation du relief de 7,5 cm maximum. De cette interface ont été générés 158.465 points de référence. Cette analyse montre que pour 99,7% d'entre eux, l'écart type obtenu est de 0,85 mm.

Le but de ce contrôle est d'évaluer la pertinence et le crédit qui peut être apporté à cette méthode dans un contexte d'utilisation courante. Cette comparaison qui peut paraître comme un exercice simpliste est pourtant une démarche fondamentale dans l'analyse de qualité d'une mesure. En effet, la répétabilité permet de faire un constat sur la variation des mesures enregistrées sans toutefois en déterminer la cause. Dans ce cas, les conditions de réalisation utilisent le même mode opératoire, le même opérateur et appareil photo. Les résultats démontrent donc que les variations dues au choix de l'orientation des prises de vues ont une influence faible sur la réalisation du modèle. La similitude des deux portions de bloc prouve qu'un modèle généré de cette façon présente peu de déformation par rapport à la réalité des vestiges. Cette procédure constitue donc une base fiable pour des études et la description du fait archéologique.

## 5. Du dessin à la 3D

Le mobilier lithique de grande dimension, par ses contraintes d'encombrement et de poids, est particulièrement complexe à relever. Il doit néanmoins être représenté dans son contexte, notamment par rapport au plan horizontal, mais également en vue géométrale selon sa morphologie. De toutes les méthodes disponibles, la modélisation 3D est la plus appropriée et simplifie la réalisation de cette documentation comme le souligne P.-M. Duval (Duval 1972). Les difficultés que rencontrent les archéologues pour leurs relevés sont nombreuses.

Les menhirs abattus de Champagne-sur-Oise (Legriél 2011) (Fig. 1) ont été l'occasion d'évaluer une procédure de relevé avec un niveau d'exactitude supérieure et un temps de réalisation plus court (Fig. 2). Dans ce cas, même

<sup>5</sup> MNS: Modèle Numérique de Surface. Dans ce cas il correspond à un maillage constitué de TIN.

Fig. 1 – Menhirs abattus de Champagnes-sur-Oise  
vue en contexte de fouille.

si la découverte de menhirs abattus est rare en Île-de-France, le budget de ce chantier ne permettait pas de financer une prestation de scanner 3D. Cette structure a donc été l'occasion d'un premier test de relevé par photogrammétrie (hors labo). Ainsi, nous avons réalisé un modèle 3D des blocs en contexte de fouille à partir de cinquante photos.

Le dessin des vestiges réalisé en parallèle de la photogrammétrie a été effectué de façon classique à partir de mesures manuelles calées sur deux axes perpendiculaires. Ce type de relevé qui a pour fonction d'enregistrer la géométrie du fait archéologique est soumis, par nécessité technique, à l'arbitraire ou à la part d'interprétation du dessinateur. Ceci impose donc une part d'erreurs difficilement quantifiable. Toutefois, certaines imprécisions sont mesurables comme les tracés reportés entre deux cotes qui ne sont que des estimations qui n'ont pour rigueur que le talent de l'illustrateur. On peut aussi noter comme principales sources de déformation la distance de la prise de cotes par rapport aux axes de référence ou l'irrégularité du relief. Il est également utile d'avoir à l'esprit que sur un dessin réalisé au vingtième, un trait de crayon de 0.5 mm correspond à une incertitude sur le terrain de  $\pm 1$  cm. Cette incertitude, cumulée aux autres sources d'inexactitude, ne permet

a

b

Fig. 2 - a. Relevé manuel; b. Plan topographique des blocs en cours de fouille. Illustration obtenue par photogrammétrie.

pas d'obtenir des relevés avec une marge d'erreur inférieure à 5% pour des structures complexes.

Le dessin des blocs de Champagne-sur-Oise montre quelles difficultés a dû éprouver l'archéologue pour restituer certains éléments. L'illustration n'apporte aucune information qui permet d'apprécier l'inclinaison des dalles. De plus, certains détails sont surreprésentés comme des arêtes ou relief naturel qui prennent autant d'importance que le contour des blocs et peuvent donner ici l'illusion de cassure. Par ailleurs, l'importance du relief a contraint le dessinateur à figurer malgré lui des portions de blocs selon des angles de vue différents, créant ainsi des anamorphoses faisant varier les mesures de  $\pm 5\%$ . Enfin, le relevé manuel et les imprécisions ou les inexactitudes qu'il contient établissent une vérité péremptoire dans la mesure où le geste archéologique détruit la preuve matérielle.

Le modèle 3D confronté au dessin traditionnel permet d'évaluer la part de travail qui peut être automatisée. Le modèle 3D figure ici les reliefs par des courbes de niveau et des ombrages. Les géométries sont justes avec une résolution centimétrique et une marge d'erreur inframillimétrique. Enfin, la hiérarchie des tracés et les codes couleur ne sont pas le résultat déterminé par une technique mais une interprétation d'après une donnée brute vérifiable par d'autres. La modélisation offre alors la possibilité d'analyses contradictoires comme l'exige une démarche scientifique.

Nous démontrons, dans cette première partie, que bien qu'il soit difficile d'apprécier la justesse des mesures prises lors de notre protocole d'acquisition tridimensionnelle, elles demeurent plus fiable que celle du dessin. En conséquence, si nous acceptons la qualité des données du relevé graphique, nous pouvons accepter celle de la photogrammétrie.

## 6. Apport de la photogrammétrie dans les pratiques de terrain

### 6.1 *Le modèle 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 en vraie grandeur, la modélisation permet d'extraire des images en projection orthogonale qui servent de support à un relevé interprété. De plus, la diffusion de la documentation est obligatoirement matérialisée sur support papier. Ce mode de communication nous impose d'extraire des illustrations 2D à partir des documents 3D.

Fig. 3 – Vue du four de tuilier de Mours en cour de fouille.

Fig. 4 – Vue du modèle 3D en projection parallèle verticale selon l'axe de coupe du four et calepinage de l'élévation du four établie sur la base du modèle 3D.

Nous avons procédé de cette façon pour un four de tuilier (Mondoloni 2012) découvert à Mours (Fig. 3). La variété des matériaux employés, leur disposition et les interactions physiques qui ont modifié cette structure au cours de son utilisation rendent sa description et sa représentation difficiles. La quantité de relevés nécessaire à l'étude impose une grande précision pour maintenir leur cohérence. Que ce soit en plan ou en coupe, la projection d'un tel volume relevé manuellement produirait inévitablement des erreurs de dimension. Ainsi, 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 juste géométriquement a été projeté selon les axes de coupes et imprimé au 20<sup>e</sup>.

Dans ce cas, la modélisation n'est pas l'objectif ultime, mais s'inscrit dans une chaîne graphique comme moyen d'enregistrement de la géométrie à partir de laquelle un relevé interprété est réalisé. 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, les phases de construction et leur réparation (Fig. 4). L'orthophotographie bien que très riche en information ne permet pas de distinguer la nature des matériaux qui ont été exposés à de fortes chaleurs. L'illustration qui en résulte annule la perception de volume par l'absence d'ombrage mais permet de distinguer les matériaux utilisés en parement ou dans la masse de la construction. 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 figurer les différents éléments.

## 6.2 De la 3D au dessin archéologique

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 est la mieux adaptée à la prise de cotes sur le dessin et facilite de ce fait les comparaisons. Cependant, cette mise à plat du mobilier est un exercice difficile lorsque celui-ci est volumineux. Les meules aménagées sur un bloc de grès du Néolithique final découvertes à Ballancourt-sur-Essonne (Saron 2012) sont un exemple de mobilier compliqué à dessiner. Bien que sa forme s'inscrive dans un parallélépipède, la projection de chacune de ces six faces selon des plans perpendiculaires les uns par rapport aux autres est un travail ardu.

Sur ce bloc, deux faces d'utilisation sont aménagées avec des meules et des surfaces polies (Fig. 5). Son pourtour est quant à lui paré d'une série d'éclats d'épannelage et ses dimensions, de 125×80×35 cm pour un poids de

Fig. 5 – Représentation géométrale et coupes du bloc de grès de Ballancourt-sur-Essonne.

475 kg, interdisent sa manipulation sans moyen de levage. Traitées en deux parties, 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 jusqu'au détail 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. La 3D a également facilité la création de coupes et profils selon des plans paramétrés ou libres pour fournir des informations complémentaires. Une fois le plan principal de projection défini, les différentes vues sont facilement éditables. Les normes de représentation restent les mêmes que pour le dessin classique. Ces vues sont générées avec un matériau standard permettant la visualisation du relief par restitution des ombres propres (sans ombre portée). Par ailleurs, en supprimant la couleur vraie issue des photos de l'objet, la vision n'est pas perturbée par des variations de couleur. Les illustrations obtenues constituent donc une base graphique géométriquement fiable sur laquelle les observations et les résultats d'analyse peuvent être reportés.

### *6.3 Gain de temps et sécurité des agents*

En 2010, une première intervention dans une cour de l'Hôtel des Monnaies, quai de Conti à Paris<sup>6</sup>, a mis au jour la face interne de l'enceinte de

<sup>6</sup> Diagnostic réalisé en 2010-2011 par P. Celly (Inrap) à Paris *Hôtel de la Monnaie, Quai Conti*.

Philippe Auguste sur une profondeur de 4 m. Un deuxième diagnostic réalisé en 2011 dans la même cour a permis de dégager le parement externe de cette enceinte sur la même hauteur.

L'acquisition 3D par photogrammétrie qui s'est développée à l'Inrap Centre-Île-de-France entre ces deux opérations 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 effectué 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 étalements, indispensables 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 perturbent la lecture et fournit une documentation qui autorise une étude architecturale (Fig. 6).

De plus, parce que les photographies numériques lors du premier 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 l'espace.

Enfin, ce type de relevé a un intérêt sur la sécurité et sur l'organisation du travail. En limitant le temps de présence dans le sondage pour les relevés, l'archéologue limite son temps d'exposition au risque inhérent à ce type d'excavation. Son intervention étant plus courte, le temps d'attente des terrassiers est réduit. Ainsi, l'alternance des deux activités se fait avec une plus grande efficacité

## 7. Conclusion

Cette expérimentation démontre que la 3D peut s'inscrire dans la chaîne graphique et donne un aperçu du potentiel analytique qui en découle. L'acquisition 3D par photogrammétrie s'est révélée être une solution souple et adaptée à notre activité. L'équipement minimum nécessaire à ces travaux fait partie de la dotation des centres archéologiques de l'Inrap. Cependant, il est possible d'optimiser la méthode par l'achat d'objectifs à focale courte, de matériel informatique plus performant et de drones.

De tous les systèmes de numérisation, l'acquisition 3D par photogrammétrie est la solution qui a 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 photos 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'acquisition 3D comme les scanners. En revanche, il est important de laisser l'arbitrage de l'archéologue pour décider dans quel cas de figure le recours à l'acquisition est préférable au

Fig. 6 – Enceinte de Philippe-Auguste: a. Projection vertical du parement du mur d'après la modélisation 3D; b. Vue cavalière du parement; c. Vue des contraintes du diagnostic.

dessin. Car il est évident que le relevé traditionnel présente encore dans bien des cas des avantages. Pour prendre un exemple simple, relevé en 3D un trou de poteau serrait une perte de temps et de moyen. L'illustration archéologique est porteuse d'informations que les spécialistes savent décrypter mais elle est difficilement exportable tel quel 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 dans 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 par son auteur mais également par le lecteur. Ce mode de figuration ne permettait pas alors le partage de ces données vers 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 offrir la possibilité 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 de 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 compris. Ce type de relevé représente dès lors un potentiel de diffusion plus large en permettant aussi bien la détermination scientifique que de fournir un support visuel apprécié par le public.

Mehdi Belarbi, Pascal Raymond, Nicolas Saulière, Régis Touquet  
Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap)  
Cellule Topographie-Infographie d'Île-de-France

## BIBLIOGRAPHIE

- Belarbi M., Raymond P., Saulière N., Touquet R. 2012, *L'acquisition 3D par photogrammétrie en archéologie, dossier pratique*, in *Du bon usage de la 3D en archéologie*, «Archéopage», 34, 90-99.
- Delevoie C., Dutailly B., Mora P., Vergnieux R. 2012, *Un point sur la photogrammétrie, dossier pratique*, in *Du bon usage de la 3D en archéologie*, «Archéopage», 34, 86-89.
- Duval P.-M. 1972, *Relevés photogrammétriques d'objets archéologiques*, «Gallia», 30, 30-2, 259-273.
- Héno R. 2010, *Les nouveaux potentiels*, in *Archéologie et photogrammétrie, Le dossier du mois*, «Géomètre», 2075, 26-40.

## ABSTRACT

Archaeological surveys apply to remains of various size and complexity. Our daily missions lead us to choose our means of planning with a great variation of scales. Up until now, at the Inrap, hand drawing and topography helped us conduct survey operations by recording brief amounts of information according to simplified geometric shapes. Computer evolution now offers solutions which allow us 3D acquisition by photogrammetry. They come as an additional topographic plan and can even replace our drawing of artifacts with accurate information which is not possible to achieve with traditional methods. 3D use makes representation easier in any type of projection. Free or with parameters, it simplifies the realisation of a global view by registering in the graphic chain as envisaged today. Taking measurements by traditional means requires much time which could be better used for study. Our approach which tends to dissociate the register of geometrics in the interpretation of remains, creates a more accurate framework for the analysis. Archaeological artifacts also benefit from 3D acquisition advantages. Indeed, what generally defines archaeological drawing is the application of graphic standards in descriptive geometry. This review of the artifacts is a difficult exercise and modeling makes it easier. The illustrations obtained therefore constitute a reliable geometrically graphic basis on which observations and analysis results can be reported. We found that 3D acquisition by photogrammetry was a suitable and flexible solution to our activities. The richness and quality of these surveys are an asset for the analysis and storage of information. Moreover, the time invested in these projects is less than that used with traditional

## BIENFAITS ET LIMITES D'UN ENREGISTREMENT LASERGRAMMÉTRIQUE DANS LA TOMBE À COULOIR DE GAVRINIS (MORBIHAN, FRANCE)

### 1. Problématique

La tombe à couloir édifée au sommet de l'île de Gavrinis (Larmor-Baden, Morbihan), dans l'estuaire de la rivière de Vannes, est un monument néolithique majeur de l'Ouest de la France (Fig. 1). Sa réputation depuis le XIX<sup>e</sup> siècle se fonde essentiellement sur les gravures nombreuses, bien visibles sur les parois de la chambre et de la structure d'accès. Construite au début du IV<sup>e</sup> millénaire (3900-3800), elle sera fermée et l'entrée largement occultée vers 3400 (Le Roux 1995). Ni son plan, assez banal, ni son élévation interne, assez classique pour une architecture de seconde génération (moins grande différenciation entre couloir et chambre: Boujot 1996) ne surprennent et ne singularisent Gavrinis. La masse du cairn est cependant importante, en rapport avec un couloir prolongé, et se différencie d'autres enveloppes externes contemporaines qui, à l'origine, ne couvraient pas la dalle de couverture (Table des Marchands, pour ne citer que la plus connue dans la région: Cassen 2009).

Les signes gravés à Gavrinis ont été bien des fois interprétés et continuent de l'être. Mais les discours les plus récents s'établissent encore sur des modèles graphiques au mieux issus des excellents levés à la feuille cellophane opérés par E. Shee-Twohig (1981), au pire tirés d'une littérature déjà ancienne (XIX<sup>e</sup> siècle et débuts du XX<sup>e</sup>) déformant le modèle, ou produits pour l'occasion mais sans discipline particulière dans la reproduction des tracés. Toute révision archéologique d'un signe ou d'un motif doit pourtant passer par un nouvel enregistrement des données, où l'emploi des outils dits numériques (acquisition, traitement, représentation) s'avère désormais indispensable pour mieux progresser, en révélant, notamment, le rapport éventuel entre la position du signe et la morphologie du support que seule la restitution tridimensionnelle permet d'établir (lasergrammétrie, photogrammétrie, etc. ou aquarelle).

La publication du programme de recherches consacré aux monuments de Locmariaquer (Grand Menhir, Er Grah, Table des Marchands: Le Roux 2006; Cassen 2009) et celle relative à la fouille du tertre funéraire de Lanec er Gadouer (Boujot, Cassen 2000a), toujours en Morbihan, ont permis d'éclaircir la chronologie du phénomène des pierres dressées et de suggérer une grille de lecture des compositions gravées en surface (Cassen, Vaquero 2003). Il devenait alors tentant d'interroger le corpus de Gavrinis à la lumière de ce cadre conceptuel, et ce d'autant mieux que les deux monuments principaux à Locmariaquer et Larmor-Baden se partagent deux fragments

d'une stèle plus ancienne réemployés pour assurer la couverture des chambres respectives (Le Roux 1984).

Après un levé photographique des lames de haches et la détection de colorations rougeâtre à leur contact en 2007 – résultats présentés au colloque de Besançon en 2009 dans le cadre du programme JADE (Pétrequin *et al.* 2012) – un projet d'enregistrement fut donc décidé en 2010, principalement assuré par la lasergrammétrie<sup>1</sup>. On exposera brièvement ici la méthodologie, les outils employés et le traitement des données obtenues de différents instruments. Nous verrons toute la portée positive de cette démarche, mais en même temps les limites rencontrées dans la détection des gravures les moins profondes, et, partant, les moyens trouvés pour mieux les restituer.

## 2. L'enregistrement lasergrammétrique

Si l'enregistrement lasergrammétrique est une technique désormais relativement banalisée, les contraintes propres du sujet peuvent rendre particulièrement complexe la mise en place du protocole. Le site de Gavrinis présente ainsi plusieurs difficultés pour une opération de ce type (implantation sur une île). L'objet, lui-même, impose plusieurs matériels pour passer de l'échelle métrique à l'échelle millimétrique. Le cairn fait 51 m par 40 m; le couloir fait 1,30 m de large avec des étranglements à 85 cm, sur une longueur de 11, 25; la hauteur sous plafond varie de 1,50 m à 1,71 m. La chambre est un trapèze de 2,20 m par 2,76 m pour une hauteur sous dalle de 1,71 m.

### 2.1 Deux niveaux d'acquisition des données: architecture et gravure

Un Leica Geosystems C10 a été utilisé pour le relevé de l'enveloppe extérieure du cairn et de l'ensemble du couloir. Ce système a été retenu pour sa polyvalence, permettant en une seule campagne de capturer l'architecture générale et un minimum de détails des orthostates. Le Leica possède une portée de 300 m (albédo 0,9), 134 m (albédo 0,18) et une distance minimum pour l'acquisition de 0,1 m. La résolution des scans se caractérise par la taille du point laser qui est ici, de 0 à 50 m: 4,5 mm (basé sur FWHH), 7 mm (basé sur Gauss); l'espacement entre les points sur tout le champ Hz et V est inférieur à 1 mm sur toute la portée, en fonction du pointage. Six stations ont été installées tout autour et

<sup>1</sup> Les campagnes programmées sur Gavrinis ont été rendues possibles grâce au financement accordé par le département du Morbihan, par ailleurs propriétaire du monument, et le Ministère de la Culture (DRAC Bretagne). Le CNRS, l'Université de Nantes (UFR Histoire et archéologie) et l'École nationale supérieure d'architecture de Nantes ont contribué à cet effort financier et matériel. Le Laboratoire de recherches archéologiques (UMR 6566) a porté la responsabilité de l'opération devant la CIRA Grand Ouest. Nous sommes enfin très reconnaissants de l'aide apportée par C. Boujot (Service régional d'archéologie, Rennes), Y. Belenfant (Sagemor, Vannes), O. Agogué (Service départemental d'archéologie, Vannes) et E. Vigier (Musée de Carnac).

au sommet du tumulus. Le relevé est géoréférencé et vérifié dans l'espace grâce à une borne topographique présente sur le site. Dans le même référent, huit stations sont implantées à l'intérieur du monument. Les nuages peuvent donc être assemblés en cohérence et continuité de l'extérieur vers l'intérieur.

Les orthostates du couloir (définis par une lettre – L *left*, R *right* – et un n° d'ordre: Shee-Twohig 1981) et la dalle de couverture ont été numérisés en infra millimétrique avec le système Krypton K610 de Nikon Metrology associé au logiciel d'acquisition Kube. Le scanner travaille avec un faisceau laser dont la largeur atteint 200 mm. La précision du K610 est de 37 µm; pour les orthostates, une précision de 0,5 mm nous a semblé suffisante. Chaque nuage correspondant à un pilier du couloir ou de la chambre funéraire compte de trois à cinq millions de points. Vingt-trois orthostates ont été numérisés. Le logiciel Focus Inspection a été utilisé pour un premier nettoyage des nuages et la préparation de modèles numérisés au format STL.

L'ensemble des orthostates numérisés produit 72. 399. 271 points. L'enveloppe du cairn et le sol autour totalisent 3. 937. 900 points. Un travail important de nettoyage doit être effectué, principalement sur les végétaux environnant le site et bien entendu enregistrés par le laser, et sur les éléments très éloignés, ne faisant pas parti du site. En additionnant la totalité des données, et en supprimant les redondances, on obtient 93. 564. 468 points utiles pour le travail de modélisation et de rendu. L'ensemble des nuages est géoréférencé dans un système de coordonnées Lambert II et IGN 69.

## *2.2 Post-traitement des nuages de points*

Nous laisserons de côté le cairn pour nous en tenir à la structure interne. Chaque orthostate a fait l'objet d'un fichier séparé, géoréférencé de façon cohérente, pouvant donc être assemblé avec les autres nuages de points pour reconstituer l'ensemble du couloir et de la chambre. Les orthostates au format XYZ ont été chargés à 100% de définition, puis maillées.

La contrainte principale est la granulosité des dalles. Le grain de la pierre est interprété par les logiciels de traitement des nuages de points comme du bruit qu'il s'agit d'éliminer. Or, l'information utile se trouve au milieu de ce bruit. Il faut donc pouvoir "débruiter" les zones où l'information utile est de moindre importance et préserver les détails dans les zones à fort enjeu. Pour cela, un clone du maillage original a été réalisé. Si les reliefs de la stèle sont assimilables à une courbe comprenant beaucoup d'irrégularités, une méthode assimilable à celle des moindres carrés permet d'obtenir une forme de régularité dans le tracé général. Mais le lissage ne permet pas de conserver l'information. On va donc superposer les deux maillages et jouer sur la différence de l'un par rapport à l'autre, opération menant à une *carte des écarts*. En mesurant le spectre d'écartement entre la surface lissée et la

surface d'origine, on obtient une mise en évidence des tracés par simples variations de couleurs. En jouant sur la précision du spectre et la plage de relief à prendre en compte, les gravures se manifestent de façon plus ou moins évidente suivant leur altération.

Aucun orthostate ne peut faire l'objet de réglages identiques. Si le principe reste le même (clonage du maillage, lissage et affichage simultané), la densité et la profondeur des gravures, la granulométrie de la pierre, demandent pour chaque cas de trouver le réglage optimum.

### 2.3 Premiers résultats et premiers usages archéologiques

Les images obtenues grâce à une première exploitation des données informatiques ont rapidement permis d'apprécier le pas accompli en regard de la documentation disponible. En voici cinq champs d'application qui nous paraissent significatifs de cet avancement, et qui permettent de répondre d'ores et déjà à plusieurs questions posées par le programme de recherche:

- L'analyse architectonique de l'édifice est rendue possible, et sur une base irréprochable. A la différence de plusieurs tombes à couloir régionales publiées (Mané Lud, Mané Rutual, Petit Mont, Table des Marchands, etc.), Gavrinis n'a pu jusqu'ici compter sur des élévations et un plan rigoureux (notre planimétrie s'écarte d'ailleurs du plan le plus récent, non en longueur mais en angulations, avec 25 cm d'écart en sortie du couloir). Les mensurations exactes sont désormais connues et l'inscription de la tombe dans son enveloppe apparaît enfin clairement, comme en transparence, et compte tenu bien sûr des restaurations qui ont affecté l'ensemble. La détection même d'un tertre bas sous-jacent à la construction du cairn (Closmadeuc 1886; Boujot, Cassen 2000b, 155) est rendue possible par ce travail fin en altimétrie et par superposition des "coupes" de terrains (Fig. 1).
- Les tracés gravés sont ensuite restitués en regard de la morphologie des supports, une avancée décisive sur les représentations graphiques antérieures. Cette corrélation est pourtant fondamentale à l'heure d'interpréter toute composition sur un support. Si des formes naturellement rondes sont mises à profit par le sculpteur pour disposer des cercles concentriques, d'autres solutions de continuité dans la pierre (fissure, rupture de pente) n'empêcheront pas de prolonger le tracé par dessus l'obstacle. Ce jeu renvoie bien sûr à des intentions.
- La chronologie des compositions par recoupements de tracés, testée en Bretagne au moyen de l'estampage (Mens 2004) ou de la photographie numérique (Cassen, Vaquero 2003b), validée ces dernières années grâce à l'emploi privilégié de cette dernière technique (Cassen, Robin 2010), devient également décelable dans le nuage de points éclairé virtuellement (Figs. 2-3).

Fig. 1 – Gavrinis, Larmor-Baden (Morbihan). Façade d'entrée restaurée, le tumulus avec ses éboulis non fouillés à l'arrière-plan; élévation méridionale, avec effet de transparence pour afficher la structure interne du couloir et de la chambre, ainsi que la masse sédimentaire sous-jacente; élévation gauche du couloir et de la chambre, les orthostates en gris foncé ne sont pas gravés (photos et traitements Cassen, Lescop, Grimaud).

– L'observation des états de surface rendue possible par ces nuages de points, d'une part, la possibilité offerte de mesurer et comparer les profondeurs des tracés juxtaposés, d'autre part, ont permis d'identifier des secteurs contigus des supports présentant des états de conservation dissemblables. Nous suggérons d'interpréter ces contrastes comme le résultat d'une altération différentielle de la pierre avant son introduction dans l'armature interne du monument. Cette érosion ne peut en effet s'être développée dans l'espace protégé du tumulus et seul un processus de météorisation dans le granite (Selier 1997) permet de comprendre ces différences que l'œil percevait assez bien sur le terrain une fois le phénomène reconnu.

– Si des tracés inédits (en L11), ou des compléments notables aux tracés déjà reconnus (en C1), peuvent être à l'évidence portés au crédit de l'enregistrement lasergrammétrique, un résultat inattendu réside enfin dans la perception d'un effacement de gravures (R5). Il ne s'agit plus cette fois d'une altération naturelle du monolithe anciennement érigé, mais d'un enlèvement volontaire de matière, très localisé, ayant emporté tout ou partie des signes gravés. Une

Fig. 2 – Chronographie des gravures (en haut). Différents cas de figures des relations d’antériorité ou de postériorité données par les nuages de points; photographies numériques en complément. Faute de tracés en creux (en bas) en raison de la dureté de la roche, la détection des teintes avec DStretch permet de faire ressortir les impacts et donc le dessin du signe (traitements Cassen, Lescop, Grimaud).

Fig. 3 - Inventaire des modelés naturels sur la surface de l'orthostate. Choix de séquences de réalisation des gravures (de B à G) et numérotation chronologique des tracés (1 à n) dans chaque séquence; diagramme de l'ordre stratigraphique recomposé (traitements Cassen, Lescop, Grimaud).

surface peut être ainsi identifiée et circonscrite, marquée d'impacts grossiers effaçant les tracés, mais sans pour autant les faire entièrement disparaître puisque les éclairages virtuels font encore ressortir la trame sous-jacente en accord avec la composition générale.

### 3. Un cas limite: la dalle R11

L'orthostate R11 est en grès, à la différence des autres dalles gravées (granite, orthogneiss). Réputé pour être le moins décoré du monument (Shee-Twohig 1981), le relevé par cet auteur a néanmoins permis une restitution de plusieurs tracés dans le style attendu, exercice difficile puisqu'ils sont pour l'essentiel invisibles à l'œil nu. Il ne s'agit pas en effet de signes profondément inscrits dans la roche mais de simples impacts peu répétés en surface d'un matériau beaucoup plus dur que le granite (Fig. 2).

#### 3.1 *Limites instrumentales*

L'éclairage virtuel sur le nuage de points traité offre peu ou prou le même résultat visuel selon le logiciel utilisé (Meshlab, Geomagic, etc.), mais la précision dans le paramétrage numérique proposé dans Meshlab (*Render/ Shader/ Lattice/ Light position*) permet à un autre opérateur de reprendre l'expérience dans les mêmes conditions d'incidence, alors que Geomagic n'offre qu'un déplacement manuel de la "torche". Mais cet éclairage virtuel montre également ses limites dès l'instant où plusieurs tracés se répètent en se "touchant" et par conséquent sans que l'œil ne puisse distinguer parfois ce qui est en creux et ce qui est en relief dans les ombrages produits par le logiciel. Ce leurre visuel ne serait pas important si une chronographie des tracés ne devait pas se construire sur des éclairages incidents et tournants.

Dans le cas de R11, la difficulté est augmentée par la mauvaise détection des creux, ces derniers étant presque inexistantes en raison de la dureté du grès qui a empêché le sculpteur de rentrer dans la matière par percussion répétée, à l'instar des dalles voisines où la gravure peut atteindre 5 mm de profondeur. L'enregistrement infra-millimétrique annoncé est par conséquent insuffisant, et tous nos essais ont été vains pour faire ressortir ces tracés.

#### 3.2 *Premier complément d'enregistrement: acquisition par photos numériques et éclairages tournants*

Devant cette impasse, un levé par photographies numériques a été conduit depuis une station fixe placée face au monolithe, calée par bulle et orientée sur le centre géométrique mesuré sur la pierre. L'appareil utilisé est un Nikon

Fig. 4 – Etapes de représentation de l'orthostate R11: a. Levé Shee-Twohig 1981; b. Modèle du nuage de points (traitement Geomagic); c. Tracés redressés de 23 clichés sous éclairages rasants (photos DSC\_0002 à 0066); d. Photo sous éclairage frontal DSC\_0080; e. Photo DSC\_0032 traité dans DStretch (espace de couleur LDS, échelle 30); f. Photo DSC\_0047 traité dans DStretch (espace de couleur YRE, échelle 30); g. Tracés redressés à partir de 13 clichés traités dans DStretch; h. Tracés sur la morphologie de la dalle traitée dans Geomagic; i. Synthèse provisoire ordonnée des gravures.

L'éclairage fut assuré par une torche Litepanels (96 *led* Kaiser, StarCluster), lumière du jour (5600° K; 500 lux; DC5,6-16,8 v.). Toutes les photographies numériques au format NEF ont été corrigées des déformations de l'objectif 10,5 mm par le biais de Photoshop CS5 et sauvegardée au format TIF. La tablette graphique employée est celle de Wacom (Intuos).

Le principe de l'acquisition consiste à prendre frontalement à la dalle un maximum de photographies sous éclairage rasant tournant, en multipliant les incidences lumineuses selon l'état de la gravure, puis à produire en laboratoire un dessin vectoriel en bordure des tracés en creux les plus contrastés. Le résultat est une somme de lignes orientées qui se complètent les unes les autres pour donner un contour plus ou moins certain, plus ou moins recevable, l'opérateur se devant de pondérer et de spécifier ses choix, le retour en arrière vers le document photographique initial étant bien entendu préconisé. Une synthèse est ensuite proposée à partir de ces contours superposés dans un même plan.

Sur les 268 clichés pris, 49 ont été traités en vue d'un passage à la tablette graphique. Seuls 23 clichés (entre n° 002 et 066) ont été exploités avant que l'opération ne soit arrêtée. Très vite, en effet, les limites du procédé sont nettement apparues: alors que les tracés doivent immédiatement apparaître sous éclairages rasants, peu de gravures se dessinaient nettement dans le fichier de synthèse (Fig. 4, c). L'opération à la tablette graphique s'avérait longue et difficile, trop hésitante même faute de tracés manifestes, et un test mené aléatoirement sur la série restante des photographies n'apporta aucune amélioration satisfaisante pour que soit engagé un traitement systématique.

Malgré une avancée somme toute importante par rapport au levé existant (Fig. 4, a), une solution alternative fut alors envisagée à travers un logiciel de détection des teintes.

### 3.3 *Second complément d'enregistrement: acquisition par photos numériques et détection des teintes*

Nous l'avons dit, il ne s'agit plus de creux visuellement décelables mais d'un écrasement superficiel de la roche induisant un contraste de couleur (clair sur sombre) et de texture (mat et rugueux sur le brillant et lisse de la surface météorisée du grès). Dans la mesure où les gravures ressortent finalement par ce biais, hier comme aujourd'hui, une expérience fut tentée à l'aide d'un outil de détection des colorations.

Le logiciel employé est Image J (open source, mode Java: Abramoff *et al.* 2004), inspiré du programme de traitement de l'image développé à l'origine pour Macintosh. Au-delà de l'imagerie médicale, champ d'application originel, il est désormais utilisé pour des levés de peintures rupestres (Gunn *et al.* 2010). Nos photos ont donc été traitées à travers le plug-in DStretch

(Harman 2008, version 7.1; <http://www.dstretch.com>). Le principe est de détecter des différences de teinte et de les mettre en évidence. Les options sont nommées d'après les espaces de couleurs utilisés, ceux-ci s'appellent (entre autres) RGB, LAB, YDS, YBK, LDS, autant de systèmes de trois coordonnées définissant la luminosité et la couleur des éléments de l'image. Ce logiciel a été testé avec succès dans la détection et localisation de peintures sur trois orthostates.

Un certain nombre de clichés originellement pris pour détecter les variations du relief ont donc été passés sous traitement DStretch. Contrairement à la méthode qui exige des lumières contrastées afin de faire sortir les creux, seuls les clichés éclairés de façon couvrante et satisfaisante en termes de luminosité ont pu faire l'objet de ces traitements. Nous avons ensuite mis en œuvre l'opération habituelle compilant les photographies, et le dessin s'est alors porté soit sur le contour des impacts isolés, soit sur les surfaces délimitées par ces impacts lorsqu'ils sont assez rapprochés pour former un *continuum* (Fig. 2). Le résultat obtenu est sans commune mesure avec le corpus existant (Fig. 4, g).

#### 4. Conclusions

En se fixant, comme moyen d'une recherche, l'enregistrement numérique d'un objet aussi complexe qu'un cairn de 50 m de diamètre, contenant une tombe au couloir d'accès long de 11 m, dont les parois sur 1,5 m de haut sont couvertes de gravures de 5 mm de profondeur dans le meilleur des cas, archéologues et architectes doivent adopter, adapter, modifier, détourner matériels et logiciels en vue de la réalisation d'objectifs précis au sein d'une problématique scientifique bien établie, et dans le contexte budgétaire propre à toute recherche fondamentale. Si l'approche multiscalaire est bien connue dans son application aux grottes peintes du Paléolithique, elle devrait pareillement pouvoir être développée dans ces premiers lieux d'architectures que sont les monuments mégalithiques du Néolithique. L'enjeu, cependant, est de se garder de fabriquer des images de synthèse sophistiquées qui risqueraient d'occulter toute interrogation (Maumont 2010) et de garder la main sur un processus allant de l'enregistrement à la médiation.

Les différents traitements mis en œuvre à Gavrinis montrent qu'il n'existe pas une méthode unique permettant de mettre en valeur ou de découvrir les gravures, sujet de nos études sur les représentations du V<sup>e</sup> millénaire. Plus que des réponses, le croisement de résultats issus de modélisations, de photographies et d'observations directes renouvellent le questionnement, désaxent les approches, relancent les hypothèses. Ici, les approches graphiques et de modélisation servent moins à reproduire un objet que d'entrer au cœur de sa constitution pour retrouver le geste initial du graveur, la chronologie

des tracés, puis, éventuellement, le sens profond de la démarche. Dès lors, les outils, loin de s'imposer comme révélateurs, viennent baliser un processus en perpétuelle interrogation.

Serge Cassen, Valentin Grimaud  
CNRS, Laboratoire de recherches archéologiques (LARA)  
Université de Nantes

Laurent Lescop  
Laboratoire GERSA  
(Groupe d'étude et de recherche scénologique en architecture)  
Ecole nationale supérieure d'architecture de Nantes

Didier Morel  
Morel Mapping Workshop, Vannes

Guirec Querré  
Laboratoire d'Archéosciences  
Université de Rennes 1

## BIBLIOGRAPHIE

- Abramoff M.D., Magelhaes P.J., Ram S.J. 2004, *Image processing with ImageJ*, «Biophotonics International», 11(7), 36-42.
- Boujot C. 1996, *Le Mégalithisme dans ses rapports avec le développement des sépultures collectives: approche par une synthèse à l'échelle de la France*, in *Monumentalisme funéraire et sépultures collectives, Colloque (Cergy-Pontoise 1995)*, «Bulletin de la Société Préhistorique Française», 3, 337-341.
- Boujot C., Cassen S. 2000a, *Explorations du tertre de Lannec er Gadouer. Les fouilles de 1993 à 1997*, in S. Cassen (ed.), *Eléments d'architecture (Exploration d'un tertre funéraire à Lannec er Gadouer, Erdeven, Morbihan. Constructions et reconstructions dans le Néolithique morbihannais. Propositions pour une lecture symbolique)*, Mémoire 19, Chauvigny, Asso, Publications chauvinoises, 29-91.
- Boujot C., Cassen S. 2000b, *La constitution sédimentaire des tertres*, in S. Cassen (ed.), *Eléments d'architecture (Exploration d'un tertre funéraire à Lannec er Gadouer, Erdeven, Morbihan. Constructions et reconstructions dans le Néolithique morbihannais, Propositions pour une lecture symbolique)*, Mémoire 19, Chauvigny, Asso, Publications chauvinoises, 153-164.
- Cassen S. (ed.) 2009, *Autour de la Table. Explorations archéologiques et discours savants sur une architecture néolithique restaurée à Locmariaquer, Morbihan (Table des Marchands et Grand Menhir), Actes du colloque international (Vannes, Morbihan 2007)*, Université de Bretagne-Sud, campus Le Tohannic, Nantes, Université de Nantes, LARA, 918.
- Cassen S., Vaquero Lastres J. 2003a, *Le désir médusé*, in J. Guilaine (ed.), *Expressions symboliques, manifestations artistiques du Néolithique et de la protohistoire, Séminaires du Collège de France*, Paris, Ed. Errance, 91-118.
- Cassen S., Vaquero J. 2003b, *Construction et déconstruction des surfaces sur les temps. Enregistrement et représentation de stèles gravées: Le Bronzo en Locmariaquer et Vieux Moulin en Plouharnel (Morbihan)*, «Revue Archéologique de l'Ouest», 20, 109-125.
- Cassen S., Robin G. 2010, *Recording art on Neolithic stelae and passage tombs from digital photographs*, «Journal of Archaeological Method and Theory», 17 (1), 1-14.
- Closmadeuc G. de 1886, *Gavrinis. Dernières fouilles sous le dallage de la chambre*, «Bulletin Société Polymatique du Morbihan», 2, 63-69.

- Gunn R.G., Ogleby C.L., Lee D., Whear R.L. 2010, *A method to visually rationalise superimposed pigment motifs*, «Rock art research», 27, 2, 131-136.
- Harman J. 2008, *Using decorrelation stretch to enhance rock art images* (<http://www.dstretch.com/AlgorithmDescription.html>).
- Le Roux C.T. 1984, *A propos des fouilles de Gavrinis (Morbihan): nouvelles données sur l'art mégalithique armoricain*, «Bulletin de la Société Préhistorique Française», 81, 8, 240-245.
- Le Roux C.-T. 1995, *Gavrinis*, Luçon, Éd. J.-P. Gisserot.
- Le Roux C.T. (ed.) 2006, *Monuments mégalithiques à Locmariaquer (Morbihan). Le long tumulus d'Er Grab dans son environnement*, «Gallia Préhistoire», Suppl. 38, Paris, Ed. du CNRS.
- Maumont M. 2010, *L'espace 3D: de la photogrammétrie à la lasergrammétrie*, «In Situ: Revue des patrimoines», 13 [consulté le 2011.09.15].
- Art rupestre: la 3D un outil de médiation du réel invisible?* ([http://www.insitu.culture.fr/article.xsp?numero=13&id\\_article=maumont-489](http://www.insitu.culture.fr/article.xsp?numero=13&id_article=maumont-489)).
- Mens E. 2004, *Etude technologique des gravures de Mané er Hroëk (Locmariaquer, Morbihan): un nouveau cas de crose transformée en hache*, «Bulletin de la Société Préhistorique Française», 101 (1), 105-116.
- Pétrequin P., Cassen S., Errera M., Klassen L., Sheridan A., Pétrequin A.M. (eds.) 2012, *Jade. Grandes haches alpines du Néolithique européen, V<sup>e</sup> et IV<sup>e</sup> millénaires av. J.-C.*, Besançon, Presses Universitaires de Franche-Comté et Centre de recherche archéologique de la Vallée de l'Ain, Collection Les cahiers de la MSHE Ledoux, 2 vol.
- Shee Twohig E. 1981, *The Megalithic Art of Western Europe*, Oxford, Clarendon Press.
- Sellier D. 1997, *Utilisation des mégalithes comme marqueurs de la vitesse d'érosion des granites en milieu tempéré: enseignements apportés par les alignements de Carnac (Morbihan)*, «Zeitschrift für Geomorphologie», 41/3, 319-356 (<http://www.dstretch.com>).

## ABSTRACT

Gavrinis, on the estuary of the river Vannes, is known for the extraordinary abundance of engravings preserved on the monolithic wall pillars. These engravings have of course contributed to the reputation of the site, to such an extent that the terms “temple” or “sanctuary” have spontaneously added themselves to the notion of sepulchral space which is generally applied to this family of Neolithic architecture. Our objective is to re-qualify these representations using a new frame of reference, based on a new corpus of engraved signs, including their architectural context and position in the volume of the rock. Recording of the topographical, archaeological, petrographic and acoustic data of the cairn and the passage grave provides a representation of both architecture and engraved (or painted) signs. Our survey involved recording geolocal data (108 million points), with different scales of acquisition. Thus the whole cairn and surrounding ground were scanned using a time-of-flight camera. Then the walls of the tomb and the upper face of the cover slab were recorded with a second scanner with infra-millimetric resolution. Different software treating point clouds were tested to find the best tool for rendering the engravings using a graphic tablet. For the engraved signs on granite, a comparison of methods is proposed, showing the advantages and disadvantages of old techniques (stamping, tracing paper, polyethylene cellophane) in relation to new techniques (digital photographs, scanner 3D). There is no doubt that the scanner enables engravings to be reproduced with the exact relief of the rock, as well as in the architectural sequence of the monument. However, the precision of scanner recordings of surface lines on hard rock (sandstone) is no greater than that of digital photography with oblique lighting or digital image process revealing colors. The two methods are thus complementary.

## AFT: SCANNOGRAPHIE 3D APPLIQUÉE À L'ARCHÉOLOGIE ET AU PATRIMOINE

### 1. Présentation technique et méthodologie

#### 1.1 *Le matériel de LaserScan 3D*

Il existe deux types de matériel de numérisation laser 3D. Un appareil sur trépied pour les grandes surfaces et un appareil à tenir à la main pour numériser des objets plus petits et avec une meilleure précision.

Les relevés laser sur de grandes surfaces sont réalisés avec un LaserScan Focus 3D 120 de marque Faro. Il permet de numériser de grands objets, des statues, des monuments, des façades, des pièces intérieures et des sites archéologiques. Cet appareil a une portée de 120 m. Il permet d'atteindre une précision au millimètre près et de capturer jusqu'à 976 000 points par seconde.

D'un point de vue pratique, l'appareil tourne sur lui-même à 360° en horizontal et un miroir situé au milieu de l'appareil tourne à 360° verticalement. Ainsi, le laser irradie tout son environnement à 360° dans toutes les directions (il y a seulement une petite zone d'ombre sous le trépied). Le laser du scanner relève tous les obstacles qu'il rencontre autour de lui. Cela permet donc d'obtenir une sphère de point (généralement 50 millions de points) dans un rayon de 120 mètres autour de l'appareil. Il est possible de réduire l'angle de relevé du scan seulement à une zone souhaitée (par exemple lorsque l'on travaille sur des façades ou des statues). Plusieurs stations sont réalisées afin de pallier à d'éventuels angles morts et zones d'ombres, augmenter la densité de points et donc la précision du relevé. Toutes les stations seront ensuite assemblées lors du traitement en bureau afin d'obtenir un seul nuage de point pour chaque mur ou chaque vestige. Le traitement permettra de supprimer tous les éléments qui n'intéressent pas l'étude archéologique. Le nuage de point sera enfin transformé en modèle maillé.

Le LaserScan peut prendre automatiquement et directement des photos avec le miroir après le relevé laser afin d'appliquer la texture colorisée sur le nuage de points. Cependant, la qualité est optimisée en prenant des photographies indépendamment avec un appareil photographique performant afin de les appliquer ultérieurement sur le modèle 3D. Les photos sont effectuées avec un appareil photo Nikon D 200 disposant d'une résolution de 17 mégapixels et avec des optiques calibrées 14mm et 85mm.

Des photos générales en grand angle de chacune des élévations ou vestiges sont tout d'abord effectuées d'assez loin et de différents endroits afin

d'obtenir des photos complètes de chaque mur ou vestige mais d'angle différents. Ensuite des photos de détail sont prises de plus près pour augmenter la précision et la résolution.

Les photos subiront tout d'abord un premier traitement afin de prendre en compte les paramètres et réglages de l'appareil et de ses optiques. Ainsi une première correction des déformations et distorsions sera appliquée. Un traitement et des corrections sur la luminosité, le contraste et la qualité des images seront également effectués. Ensuite, les photographies d'un même mur ou vestige prises de plusieurs angles différents seront d'abord traitées avec un logiciel de photogrammétrie pour obtenir au final une seule photo de chaque élévation. Ces orthophotos redressées et avec les distorsions corrigées permettront d'effectuer toutes les mesures souhaitées et donc servir de base pour les études.

La deuxième technique utilisée pour la réalisation d'orthophotographie sera d'appliquer les photographies sur les modèles 3D issus des relevés laserscanner. Ainsi, le nuage de point maillé du relevé laserscanner sert d'armature et de squelette sur lesquels s'apposent les photographies. Ainsi, les photos possèdent dès lors les propriétés métriques du modèle 3D et notamment des coordonnées X, Y, Z pour chaque point de la photo. Les photographies, tout en gardant leur qualité et leur haute définition, sont maintenant redressées, sans aucune distorsion et lisibles comme des plans avec toutes les possibilités de mesure de haute précision. Il s'agit là encore au final d'orthophotographie. Il est donc possible d'éditer des orthophotos-plans aux échelles souhaitées (1/50<sup>e</sup> et 1/20<sup>e</sup>) afin de servir de support aux archéologues, pour leur annotations notamment.

Pour les objets mobiliers, les restes anthropologiques et des détails sur certains vestiges, nous utilisons un autre appareil que nous tenons directement en main avec une poignée. L'Handyscan Viewscan est un appareil couplant relevé laser et acquisition photo. Il est doté d'un laser de classe II, émettant un point laser en croix sur l'objet. Cette croix laser est captée par deux caméras placées comme des yeux. Ces caméras captent la croix laser pour enregistrer sa position. De plus, elles permettent d'acquérir la couleur de l'objet. Cet appareil prend 18 000 mesures par seconde, atteint une résolution de l'ordre du 1/10<sup>e</sup> de mm, et une précision de 0,05 mm. La précision volumétrique est de 0,02 à 0,2 mm/m. La profondeur de champ est d'environ 150 mm. L'aire de la croix laser couvre 210×210 mm. La résolution des couleurs peut varier entre 50 et 250 DPI selon le réglage. La couleur des textures est acquise en 24 bit SRGB calibrée.

Chaque relevé au handyscan produit trois fichiers liés (.obj, BMP et MTL) alliant relevé laser métrique et couleur des textures. Parmi plusieurs formats possibles nous exportons les données en format .obj (et de temps en temps en .stl quand nécessaire).

## 1.2 Traitement informatique pour la modélisation des données 3D

Une fois les données laser acquises sur le terrain, accompagnées éventuellement de photos, il y a ensuite tout un mode opératoire de traitement post-acquisition sur ordinateur. Il faut traiter et assembler les nuages de points ainsi que toutes les possibilités et applications possibles à partir des modèles 3D.

Une station de scan donne une sphère de points autour de la station (environ 5 à 40 millions de points par station selon la zone scannée et les réglages, résolution et qualité notamment). Chaque nuage de points (1 nuage de point par station de scan) issu du scan est au format .fls. Les nuages de points sont recalés entre eux sur le logiciel SCENE (édité par Faro). Ce recalage se fait grâce aux sphères et aux plans remarquables communs à plusieurs nuages de points. Ce logiciel SCENE sert également à exporter les nuages de points, calés ou non, et avec la possibilité de sélectionner une zone restreinte, au format .xyz, lisible par les logiciels de modélisation 3D. En effet, le format de base .fls des données brutes n'est pas lisible tel quel par les logiciels de 3D.

Ensuite, nous utilisons le logiciel Geomagic Studio (versions 10 et 12) pour le traitement et la modélisation. Nous importons les fichiers de points en format .xyz issus de SCENE. Mais ce logiciel permet également l'import de fichiers wavefront (.obj). Il faut vérifier chaque nuage de points. Nous devons traiter le bruit et les aberrations. Il faut vérifier le calage fait sur SCENE entre les nuages de points ou bien le faire directement sur ce logiciel. S'il faut caler les nuages de points sur Geomagic, il est possible d'effectuer cela directement sur les nuages de points par comparaison de 10/15 points identiques sur deux nuages en comparaison. Mais le moyen le plus fiable est de transformer chaque nuage de points en modèle maillé (polygones) via la commande "wrap" puis de sélectionner des zones de relief remarquables à deux modèles. L'ordinateur, par calcul, ajuste deux modèles l'un par rapport à l'autre. Il faut seulement contrôler l'écart de calage en mm après cette opération. Cette opération d'ajustement de deux modèles ensemble s'appelle "Bestfit" ou "alignement". Il faut répéter cette opération le nombre de fois nécessaire selon le nombre de nuages. Pour terminer, il ne reste plus qu'à fusionner les différents nuages en un seul modèle homogène et cohérent. Il est également possible d'appliquer des photos sur un modèle maillé (notons que le laserscanner permet si on le désire d'acquérir directement les couleurs et d'avoir directement des nuages de points colorisés). Nos fichiers de travail Geomagic sont au format .wrp. Nous exportons ensuite régulièrement des fichiers 3D maillés aux formats wavefront (.obj) et .stl. Il est également possible d'exporter aux formats .3ds (mais limité à des modèles de 65 000 polygones, pour de très petits modèles ou pour des modèles dégradés) pour ouverture sur le logiciel Google Sketchup (.skp) et .dxf (pour ouverture sur

## 2. Applications sur des fouilles archéologiques classiques et sur toutes les périodes

### 2.1 Grottes préhistoriques au Puy en Velay

Un laboratoire universitaire et CNRS (dir. J.-P. Raynal) a fait appel à la technologie laserscanner sur deux grottes paléolithiques au Puy-en-Velay (Auvergne). Les grottes de Sainte-Anne et du Rond du Barry datent de 150 000 à 200 000 ans et les niveaux datant de 50 à 60 000 ans étaient en cours d'étude. Elles ont été occupées par des hommes de Neandertal et des hommes modernes (homo sapiens sapiens).

Pour ces deux grottes, nous avons réalisé un relevé lasergrammétrique au LaserScan Faro Focus 3D 120. Le dénivelé et le relief accidenté de ces grottes ont fait apprécier l'utilisation d'un laserscanner léger et manipulable très facilement. La simplicité de positionnement des stations et de réglage de hauteur de pied ont permis d'intervenir dans toutes les parties de la grotte, même celles où le plafond de la voûte était relativement bas.

Nous avons donc placé le laserscanner à plusieurs endroits de ces grottes de manière à les quadriller intégralement sans zones d'ombre. Des sphères magnétiques de calage ont été placées aléatoirement de façon à quadriller le sol de ces grottes de manière homogène. Ces sphères sont repérées automatiquement sur les relevés 3D en traitement post-acquisition au bureau et permettent de recalibrer les différentes stations entre elles pour n'obtenir au final qu'un seul et unique nuage de point.

En une journée ces deux grottes ont été relevées au laserscanner et des photos complémentaires ont été prises. Une des difficultés de ces relevés puis de la modélisation inhérente était la grandeur de ces grottes (notamment la Rond du Barry), l'impossibilité de réduire les angles de scan (il fallait acquérir tous les points à 360° puisqu'il fallait prendre le sol, les parois et la voûte des grottes), et la complexité du relief.

La grotte Rond du Barry présentait également trois contraintes topographiques: un petit boyau très étroit au fond de la grotte, une faille assez profonde à l'entrée et des éboulis à l'entrée masquant l'intérieur de la grotte par rapport à son entrée. La facilité de manipulation du laserscanner a permis de descendre dans la faille et dans le petit boyau, mais ces parties ont été difficiles à recalibrer avec le reste du levé. La présence de gros éboulis de pierre ont également compliqué le rattachement entre l'intérieur et l'entrée extérieure de la grotte.

Le deuxième problème majeur (notamment sur la grotte Rond du Barry encore une fois puisqu'elle est plus grande et plus profonde) était la luminosité. En effet, la luminosité allait bien évidemment en décroissant depuis l'entrée des grottes jusqu'au fond, si bien que la partie la plus éloignée de l'entrée était

Fig. 1 – Modèle 3D. Grotte Sainte-Anne.

dans une semi-obscurité. Nous avons fait les relevés en choisissant d'acquérir directement la colorimétrie avec l'appareil. Ainsi, en traitement, tous les points étaient colorisés et nous obtenions donc un modèle 3D maillé/polygoné en couleur. Cependant le manque de lumière vers le fond de la grotte rond du barry a donné une texture colorimétrique non homogène et très sombre sur une moitié du modèle 3D. Ce problème est très spécifique à un tel site en grotte avec un évident déficit en lumière. La solution technique pour pallier à ce problème aurait pu être l'apport de luminaires. Cela était techniquement difficile à mettre en place pour l'équipe pour laquelle nous intervenions, car loin de toutes sources d'électricité il aurait fallu apporter des luminaires sur batterie ou un groupe électrogène, avec les moyens limités d'un groupe de recherche universitaire et le dénivelé très escarpé d'accès aux grottes. De plus, les luminaires auraient forcément été présents dans le champ de relevé du scanner et auraient donc entraînés des zones d'ombre. Il aurait également été difficile de mettre en place un éclairage homogène et diffus afin de ne pas avoir des zones plus éclairées que d'autre.

L'autre solution pour appliquer les textures colorimétriques aurait été, non pas de prendre directement les couleurs avec le scanner, mais de prendre

des photographies avec un appareil photo sur le terrain puis de les appliquer sur le modèle 3D en post-traitement. Cette solution se heurtait cependant aux mêmes contraintes liées au manque de lumière. Elle présentait même l'inconvénient, étant donné la grande longueur de la grotte Rond du Barry associée à une hauteur et une largeur relativement restreintes, qu'il n'était pas possible de faire de photos de grands zones. Il fallait couvrir en photographies de petites zones successives se chevauchant pour couvrir l'intégralité des parois de la grotte. Il aurait été difficile en post-traitement de repérer aisément à quelle partie du modèle 3D correspond chaque photographie. Il est compliqué de localiser rapidement chaque photo car les variations de la paroi ne se distinguent pas aussi facilement que différentes parties d'une façade, d'une statue ou d'une pièce par exemple.

La méthode d'acquisition directe de la colorimétrie par le scanner, et donc la mise en relation automatiquement avec le point relevé au laser correspondant, restait donc la meilleure solution même si la texture est très sombre vers le fond des grottes.

L'acquisition de ces données et la réalisation de modèles 3D avait deux intérêts principaux pour l'archéologue étudiant ce site. Tout d'abord, il souhaitait présenter au public, via Internet et une borne interactive dans un musée, ces deux sites inaccessibles. La technologie 3D permet de présenter exhaustivement et objectivement ces deux grottes telles qu'elles sont réellement et sans aucune création hypothétique en image de synthèse.

Le deuxième intérêt majeur apporté par nos modèles 3D est de servir de support d'étude à l'archéologue et ses doctorants travaillant sur ces deux grottes. Un point étant acquis tous les millimètres dans ces deux grottes, l'intégralité du relief a été relevé avec précision et grand détail. Ainsi, outre l'aspect ludique de présentation du modèle 3D en vidéo animée et avec une vue navigant à l'intérieur et autour des grottes, il est possible de réaliser toutes les mesures, profils et vues souhaitées. L'archéologue avait notamment besoin de profils longitudinaux et transversaux de ces grottes (il est possible de les réaliser absolument à tous les endroits souhaités à partir du modèle 3D) sur la voûte (plafond) et sur le sol. Le modèle 3D offre une grande simplicité et rapidité de réalisation de tels profils dont l'utilisation est fréquente et importante pour les archéologues. Le modèle 3D présente aussi la possibilité de supprimer/scalper la voûte (plafond). Cela permet de ne voir directement que le sol des grottes. Il est possible de les aligner et d'obtenir ainsi des orthophotos du sol des grottes en vue zénithale. Ces vues zénithales des modèles 3D des grottes lient le relevé de point laser aux photographies prises par l'appareil. Ces orthophotos ne possèdent aucune distorsion et sont lisibles comme de véritables plans à l'échelle. Le logiciel de manipulation de ces modèles 3D permet de réaliser toutes les mesures de distances et de superficies souhaitées à n'importe quel endroit du modèle et d'exporter des captures d'écran des

orthoplans à l'échelle en format .jpg. Ainsi, ce type de document à l'échelle est ré-exploitable sur AutoCAD ou Illustrator par exemple.

## 2.2 Pompéi, *casa di Ariadna*

Dans le cadre d'une mission quinquennale que nous organisons tous les étés à Pompéi avec le Collège des Licenciés et Docteurs en Archéologie de l'Université de Valence (Espagne) avec l'autorisation de la Superintendance de Pompéi, nous avons été amenés à numériser totalement une maison pompéienne: la maison d'Ariane (*Casa di Ariadna*). Ceci répondait au triple intérêt suscité par la numérisation 3D (copie numérique conforme, support d'étude, moyen de mise en valeur et de diffusion).

Tout d'abord, cette maison pompéienne se dégradait et allait devoir subir des travaux de restauration (elle est actuellement fermée). La numérisation 3D a donc permis d'acquérir exhaustivement toutes les données concernant les élévations de cette maison. Elle est maintenant conservée numériquement tel qu'elle était en 2010. Même si la maison subit d'autres dégradations à cause du temps et des intempéries ou si des restaurations en modifient l'apparence, une version complète avant nouveaux changements sera toujours consultable. Il est également bon de préciser, pour ceux qui pensent qu'une couverture photo et des dessins des élévations sont suffisants, que la modélisation laser 3D issue de techniques de pointes très récentes, apporte réellement quelque chose puisque sur un même fichier informatique, il y a absolument toutes les données des élévations. Les relevés sont exhaustifs, neutres, objectifs et d'une grande précision. De plus les photographies sont directement appliquées sur le modèle 3D. Ainsi une sauvegarde exhaustive incluant directement toutes les données métriques et photographiques existe. Cet aspect de sauvegarde informatique, et donc de conservation, prend tout son sens à Pompéi à l'heure où de nombreux vestiges se dégradent (fin 2011 deux maisons pompéiennes dont la caserne des gladiateurs se sont effondrées).

La deuxième utilité de ce travail était d'aider les archéologues pour leur étude du bâti et de servir de base pour le projet de restauration. Enfin, le modèle 3D créé a pu être utilisé comme présentation et visite virtuelle de cette maison. Cela a été présenté sur Internet (<http://vimeo.com/3123842>). Des vidéos animées ont été réalisées au travers de ce modèle 3D. Enfin, la modélisation 3D des élévations encore existantes a servi de base à une proposition de reconstitution en image de synthèse.

## 2.3 Fouille programmée antiques d'Alesia – Moritasgus

Une équipe d'AFT Archéologie est intervenue sur le site archéologique de fouilles programmées d'Alesia Moritasgus (Université Paris 1 – CNRS, dir. Olivier de Cazanove).

Nous avons fait le relevé de l'intégralité d'un secteur de fouille d'environ 400 m<sup>2</sup>. Ce relevé a été effectué avec l'ancienne génération de laserscanner Faro ne permettant pas d'acquérir directement la texture colorimétrique. Nous avons donc appliqué en post-traitement les photos prises par l'équipe d'archéologues de terrain, et notamment des photos aériennes zénithales prises à partir d'un ballon téléguidé.

Suivant notre mode opératoire habituel, nous avons réalisé plusieurs stations de scanner de façon à quadriller tout le secteur et pallier aux zones d'ombres inhérentes aux différents sondages archéologiques et aux différents murs subsistants en élévation. Des stations de scan ont été placées en surface au bord des bermes tout autour du secteur ainsi qu'à l'intérieur du secteur au sein des sondages.

Nous avons au final obtenu un modèle 3D exhaustif et complet avec 20 millions de points de l'intégralité du secteur. Ce modèle était tout d'abord un nuage de point relevant le relief du secteur, transformé ensuite en modèle maillé. Nous avons appliqué plusieurs photos, par points de comparaisons identiques entre les photos et le modèle 3D, de façon à recouvrir totalement le modèle 3D du secteur de sa texture colorimétrique. Les photographies étant désormais liées au modèle 3D, elles sont donc automatiquement redressées, sans aucunes distorsions et chaque point possède une coordonnée X, Y, Z.

Le modèle 3D du secteur offre la possibilité d'éditer des vues obliques du secteur de tous les endroits souhaités, des vues zénithales sans avoir à faire du relevé aérien grâce à la liberté de placement des angles de vue dans le modèle 3D, de réaliser des coupes transversales et longitudinales à tous les endroits voulus du site archéologique. Ainsi, il est possible très simplement de faire des profils du sol de tout le secteur et de ces sondages, avec toutes les directions et emplacements souhaités. Nous avons également édité une version du modèle 3D avec des courbes de niveau faisant apparaître le micro-relief du secteur.

#### 2.4 *Château de Versailles*

Agissant dans le cadre d'une demande de l'Etablissement Public Château de Versailles et de Google dans le cadre de son projet *Google Art Project*, nous avons réalisé la totalité des relevés laserscanner des pièces intérieures des grands appartements, de toutes les statues et fontaines dans le parc. Ceci a été réalisé en deux mois d'acquisition des données sur le terrain avec le LaserScan Faro Focus 3D 120. La légèreté du LaserScan et sa facilité de manipulation permettait de le placer dans les endroits les plus difficiles d'accès (par exemple des rangées étroites dans l'opéra, pour des statues sur les corniches extérieures du deuxième étage, etc.). L'inclinomètre intégré est également appréciable pour compenser l'appareil s'il n'est pas possible de le mettre de niveau.

Fig. 2 – Site d'Alesia. Orthophoto et vue oblique.

Fig. 3 – Dalle gravée Alesia.

Fig. 4 – Illustration château de Versailles, chambre de la reine, scanner sur les toits, statue de la Colonnade.

Pour les pièces intérieures, nous faisons généralement quatre ou cinq stations de scanner par pièce en raison des zones d'ombre que la présence de mobilier entraîne. Nous avons réglé l'appareil pour acquérir directement les textures colorisées après le relevé laser. Chaque pièce comporte environ 20 millions de points en couleur. Nous avons ensuite transformé ces nuages de

points en modèle maillé. L'exemple le plus parlant est notre modélisation 3D de la chambre de la reine. Heureusement, pour la réalisation des relevés des pièces intérieures, nous pouvions réaliser cela tous les lundis, jours de fermeture du château au public. En effet, la fréquentation gigantesque de ce monument rend impossible tous relevés à l'intérieur en présence du public.

Concernant les fontaines et statues à l'extérieur dans les jardins du château, nous avons été obligé de réaliser les numérisations en présence du public, ce qui était parfois compliqué lors des jours d'affluence. En effet, lorsque des personnes passaient entre l'appareil et la statue ou la fontaine, cela entraînait une zone d'ombre et donc une perte de données sur l'objet relevé.

Les statues étaient relativement aisées à numériser puisqu'elles sont de tailles modestes. Nous prenions généralement quatre stations, aux quatre angles de chaque statue. Eventuellement, selon la grandeur de statue et le relief particulier (position des bras par exemple) pouvant entraîner des zones d'ombre, nous rajoutions jusqu'à quatre stations supplémentaires au milieu de chacun des quatre côtés. Certaines statues, notamment le long de la grande allée centrale entre le château et le grand canal, sont placées le long de haie, ce qui rend impossible l'acquisition de données sur l'arrière de ces statues. Nous avons donc des modèles 3D avec un trou sur l'arrière. Nous avons dû traiter ce problème en bouchant manuellement ces trous grâce à notre logiciel de traitement des modèle 3D.

Parmi les autres problématiques liées à cette intervention en extérieur il y avait la distance d'acquisition des données pour certains bronzes des fontaines et statues sur les corniches du château au-dessus du deuxième étage. En effet, les bronzes des fontaines étaient parfois au milieu de grands bassins (notamment les bassins de Neptune et d'Apollon) empêchant d'approcher au plus près des bronzes. Il en est de même pour les statues des corniches et frontons (triumphes par exemple) très loin du scanner étant donné la hauteur des façades. Il faut bien avoir en tête avec ce laserscanner, qu'il irradie son environnement avec son laser afin de faire un relevé de points de tous les éléments qu'il rencontre. Il y a donc un véritable quadrillage de points avec des lignes et colonnes de points successives. La distance entre chaque point est déterminée par le mouvement de rotation du scanner, c'est-à-dire à un angle. Une distance métrique entre deux points sur une statue ou une façade résulte d'un angle. Géométriquement, à angle égal, la distance entre deux points est croissante plus l'on s'éloigne du centre de rotation. On appelle cela la distance angulaire. Par conséquent, à un angle égal, plus nous sommes loin de l'objet à relever, plus la distance entre chaque point relevé sur la statue est importante. La précision du relevé est donc moins bonne. C'est pour cela que, dans la mesure du possible, il faut toujours essayer de se placer le plus près possible du modèle à numériser. Cependant, pour corriger ce biais, il est possible d'augmenter les paramètres d'acquisition de l'appareil,

notamment résolution et qualité. Cela entraîne notamment une réduction de l'angle de rotation (le pas) de l'appareil entre chaque point afin de diminuer la distance entre chaque point sur la statue et par conséquent la résolution du futur modèle 3D. Ces réglages permettent également de prendre plusieurs fois chaque point afin de contrôler la justesse des relevés. En effet, de plus grandes distances pourraient être source d'erreur. Tous ces réglages entraînent des durées d'acquisition beaucoup plus longues sur le terrain.

La dernière problématique sur deux mois de relevés à plein temps en extérieur fut la météorologie puisque ce type d'appareil, en raison du miroir et du laser ne peut absolument pas fonctionner sous la pluie, même modérée.

Enfin, précisons que contrairement aux pièces intérieures, les statues ont été relevées simplement en noir et blanc puisqu'elles sont de couleur uniforme blanche pour les statues bordant les allées et les parterres ou de couleur vert/bleu pour les bronzes des fontaines.

Notons que pour le traitement des statues et bronze de fontaines des jardins, une contrainte technique nous a été imposée par Google. En effet, nos modèles 3D des statues devaient être lisibles sur leur logiciel Sketchup (.skp) afin d'être ensuite intégrables sur Streetview et Google Maps. Le problème de l'ouverture de modèles 3D sur le logiciel Sketchup est qu'ils doivent être convertis en format 3ds. Or ce format n'accepte que les modèles de maximum 65 000 polygones. Ceci est contraignant puisque nos modèles 3D de statues ou bronzes de fontaines comportent généralement 6 à 10 millions de polygones! Nous avons donc été contraints d'optimiser et de dégrader nos modèles. Heureusement, cette contrainte n'était pas imposée pour les pièces intérieures.

Pour terminer sur cette présentation de nos numérisations laser 3D sur le château de Versailles, il faut expliquer la finalité de cette intervention. Ces modèles 3D serviront au château de Versailles pour proposer des présentations 3D interactives dans douze salles "Versailles historique" à l'entrée du parcours de visite dans le château ainsi que sur le site Internet Versailles 3D. Et, comme évoqué précédemment, les modèles 3D des statues et bronzes des jardins sont visibles également directement sur Internet ainsi que sur Google Earth, Google Maps et StreetView<sup>1</sup>.

### *2.5 Façades château des Deux Lion, commune de Canteleu (76) (XVIII<sup>e</sup>-XIX<sup>e</sup> siècle)*

Nous avons réalisé la numérisation 3D d'un petit château du XVIII/XIX<sup>e</sup> siècle surplombant la vallée de la Seine à proximité de Rouen. Cet exemple,

<sup>1</sup> <http://www.youtube.com/watch?v=FSHzMdfu-60>; <http://www.versailles3d.com/fr/>; <http://www.versailles3d.com/fr/credits.html>; <http://www.chaostoperfection.com/>.

bien que sortant légèrement de l'archéologie puisque touchant la fin de la période moderne et la période contemporaine, présente l'intérêt du relevé laserscanner sur des façades dans l'optique de réaliser des études de bâti. Ces relevés nous ont été demandés à l'origine avant restauration afin de sauvegarder l'état des façades du château avant travaux.

Nous avons relevé les quatre façades extérieures du château. Pour cela, nous avons réalisé plusieurs stations sur chaque façade à environ vingt mètres de distance du château. Nous avons placé trois stations (une à chaque angle et une au milieu) pour chacune des deux petites façades latérales et six stations (une à chaque angle et quatre le long de la façade) pour chacune des deux grandes façades. Notons que chacune des stations d'angle permettent d'acquérir les données sur deux façades perpendiculaires en même temps (une grande et une petite). Nous avons paramétré le scanner pour avoir une bonne résolution, qualité et précision sur tout le château (façades et toitures) malgré la distance. Nous avons pu diminuer le temps d'acquisition des données en réduisant l'angle de prise de données seulement aux façades du château. Nous avons également choisi d'acquérir directement les couleurs avec le scanner après le relevé de points. Cependant, par sécurité, nous prenons toujours des photos des façades avec un appareil photo performant.

Au bureau, après assemblage des stations et traitements, nous avons obtenu un modèle 3D du château permettant de le présenter tel quel et de le manipuler sur l'ordinateur (il s'agit d'une copie numérique conforme du château avec ses quatre façades assemblées). Cependant, ce n'est ici qu'une présentation ludique peu intéressante pour le maître d'ouvrage puisqu'il ne s'agit pas d'un château à présenter au public. L'intérêt dans ce cas réside dans l'édition de chaque façade en orthophotos/orthoplans.

À partir de notre modèle 3D alliant données métriques, coordonnées X, Y, Z de chaque point et texture colorisée appliquée précisément sur ce même système de coordonnées, nous pouvons éditer chaque façade en orthoplan. Chaque façade est donc lisible comme un plan avec son échelle choisie. Les photos appliquées sur ce plan permettent d'avoir précisément chaque élément architectural de la façade, tous les éléments de relief et parties abimées. Ces orthoplans/orthophotos sont éditables en jpg/pdf et peuvent être ouverts sur AutoCAD/Covadis, le logiciel classique de traitement de plans. Ces orthoplans peuvent servir de base pour réaliser une mise au propre en dessin filaire de ces façades. Chaque élément architectural ayant été relevé précisément par le laserscanner, tout peut être repris dans un tel dessin.

On voit bien tout l'intérêt de ce type de procédé pour l'archéologie du bâti et les relevés pierre à pierre. De plus l'acquisition des données sur le terrain et le post-traitement est relativement rapide.

### 3. Applications sur le mobilier archéologique et muséographique (relevés au Handyscan)

#### 3.1 Tête Maorie Rouen et Tête Henri IV

La tête maorie de Rouen a été l'élément précurseur dans le processus de restitution des têtes Maories à la Nouvelle Zélande. En effet, cette tête Maorie, suite à la proposition du conservateur du Muséum de Rouen de la restituer à la Nouvelle Zélande, s'est retrouvée prise entre l'inaliénabilité des collections muséographiques françaises d'une part, et l'aspect éthique d'un reste humain d'autre part. La numérisation 3D totale, exhaustive, objective et ultra précise de la tête maorie de Rouen a permis de répondre à plusieurs objectifs:

- La démarche éthique et humaine du peuple Maori souhaitant la restitution de cette tête;
- Les nécessités liées à la présentation muséographique, la France conservant une copie numérique parfaite de la tête Maorie (Varea *et al.* 2011; Varea, Lemerle 2011).

De plus, la numérisation 3D de cette tête Maorie a également apporté les trois intérêts de cette technologie que nous retrouvons régulièrement. Premièrement la conservation d'une copie numérique conforme, qui fut dans ce cas l'élément principal. Deuxièmement, obtenir un modèle 3D pouvant servir de support d'études. Notre modèle 3D a permis en effet de réaliser des coupes médicales (de Fleshing et de Charcot) et d'obtenir des profils du crâne en plan horizontal et en plan vertical. Nous avons également pu calculer le volume intra-cranien. Enfin, notre analyse micro-topographique ultra-fine permise par la haute précision du relevé laser, a mis en évidence que certains tatouages avaient été réalisés post-mortem puisque leur relief montrait qu'il n'y avait pas eu de cicatrisation. Troisièmement, cette tête Maorie non visible physiquement du public a pu leur être présentée grâce à des vidéos d'animation du modèle 3D via Internet et des journaux télévisés. Elle fera également probablement l'objet d'une présentation en borne interactive au Muséum d'histoire naturelle de Rouen.

Nous avons également numérisé et modélisé en 3D les têtes maories des muséums de Lille et Dunkerque. Les autres têtes maories françaises sont réparties en Nouvelle Zélande pour être réinhumées sans sauvegarde d'une copie numérique exhaustive.

Dans ces mêmes problématiques, nous avons également numérisé et modélisé en 3D la tête du roi Henri IV. Cette tête n'a pas vocation à être présentée au public et sera même probablement réinhumée dans la crypte royale de Saint-Denis. Cette modélisation 3D, comme pour les têtes maories, permettra une sauvegarde numérique et une présentation au public. Concernant le support d'étude, notre modèle 3D fut très important pour

Fig. 5 – Tête Maorie de Rouen.

l'anthropologue Philippe Charlier. En effet, dans le cadre de ses recherches en pathographie et en paléo-pathologie, il cherchait à prouver que cette tête était bien celle du roi Henri IV, par la reconnaissance d'éléments physiques et morphologiques remarquables, et mise en relation avec les éléments connus de ce roi par les sources historiques et picturales notamment. Notre modèle 3D a permis de bien mettre en évidence une trace de lame sur une vertèbre correspondant à une première tentative d'assassinat connue sur ce roi (le 27 décembre 1594).

Globalement, en archéologie, la numérisation conforme, objective et exhaustive des restes humains issus de fouilles archéologiques de sépultures et d'analyses anthropologiques, se pose. En effet, cette technique précise jusqu'au 1/10<sup>e</sup> de millimètre permet de mener des analyses beaucoup plus fines qu'à l'œil humain et permet de conduire une démarche éthique en réinhumant ces restes humains qui ne peuvent être considérés comme de simples objets mobiliers archéologiques, tout en conservant les copies numériques. Les Anglo-Saxons par exemple s'interrogent beaucoup sur la réinhumation des restes humains issus des fouilles archéologiques après études anthropologiques.

### 3.2 Dalles gravées Alesia

Dans le même cadre que la fouille du site antique d'Alesia Moritasgus, il nous a été demandé de numériser une inscription sur une dalle en pierre au sol. En effet, cette inscription a été très usée par le piétinement, la rendant quasi illisible à l'œil nu.

Une numérisation 3D à l'handyscan/Viewscan permet de descendre à une précision du 1/10<sup>e</sup> de millimètre et par conséquent de beaucoup mieux voir le relief qu'à l'œil nu.

Une fois le modèle 3D obtenu, il nous a été possible de jouer sur l'angle de vue, la texture, le niveau de zoom et la luminosité du modèle 3D afin de faire apparaître des inscriptions à priori indéchiffrables.

### 3.3 Biface préhistorique

Nous avons numérisé un biface préhistorique d'environ 20 cm de long. Notre technologie nous a permis d'obtenir une précision au 1/10<sup>e</sup> de millimètre. Nous avons ensuite appliqué sur le modèle 3D des photos HD prises avec un appareil photo indépendant. Cette demande souhaitait principalement pouvoir présenter de manière ludique ce biface animé en le présentant sous toutes ses faces sur une borne interactive dans un musée.

## 4. Conclusion

Au travers de ces quelques exemples de numérisation 3D au laserscanner en archéologie, nous avons pu illustrer cette technologie et son mode opératoire. Ces exemples ne sont pas isolés et nous aurions beaucoup d'autres exemples d'application sur d'autres sites archéologiques en France et à l'étranger (nous venons par exemple très récemment de mener des numérisations laserscanner sur les corps pétrifiés à Pompéi, sur le château Borely à Marseille, sur des thermes Romain à Liria en Espagne, sur des pétroglyphes précolombiens en Guadeloupe, etc.).

La plupart de nos interventions en numérisation 3D nous ont permis de mettre en évidence le triple intérêt de la numérisation laser et de la modélisation 3D:

- Copie numérique parfaite, exacte et exhaustive (précision jusqu'au 1/10<sup>e</sup> de mm);
- Supports d'étude (coupes, sections, calculs de volume, micro-topographie, courbes de niveaux, observations morphologiques ultra-précises, etc.);
- Supports de valorisation et de mise en valeur (présentation 3D en muséographie, images pour rapports de fouilles archéologiques, etc.).

Cette technologie est réellement un outil de pointe innovant au service des archéologues. Il ne va pas révolutionner l'archéologie et se substituer totalement aux anciennes méthodes. Il s'agit vraiment d'un outil supplémentaire et d'une évolution technologique permettant d'aider les archéologues, de leur faire gagner en précision et possibilités d'étude, mais également parfois de gagner du temps (cela paraît intéressant en contexte préventif). On peut donc dire que ce genre de technologie s'inscrit dans le caractère pluridisciplinaire des sciences et techniques utilisées en archéologie et qu'elle s'inscrit dans la succession de nouvelles technologies et de nouvelles sciences faisant leur apparition en archéologie depuis son origine (telles que le furent les

datations <sup>14</sup>C et la thermoluminescence, les analyses paléoenvironnementales, la géomorphologie, la micromorphologie, etc.). De plus, des vestiges et mobiliers archéologiques peuvent être présentés en modèles 3D interactifs et manipulables. Cela permet donc de présenter les résultats archéologiques avec les supports numériques de pointe de notre époque et de rendre l'archéologie accessible au grand public par cet aspect ludique.

Enfin, et pour rester dans cet aspect ludique de présentation et de diffusion au public, nos modèles 3D peuvent être présentés en réalité augmentée, c'est-à-dire qu'en présentant un support programmé type dessous de verre devant une webcam, il est possible de faire apparaître un monument ou un objet sur l'écran<sup>2</sup>. Nous pouvons également simplement mettre en ligne sur Internet nos modèles 3D en les transformant au format VRML. Nous sommes en train de développer ces protocoles de programmation.

Jean-Baptiste Lemerle, Sébastien Varéa  
Actual Foncier Topographie, Rouen (Seine-Maritime)

#### BIBLIOGRAPHIE

- Varea S. *et al.* 2011, *La fabuleuse histoire de la Tête Maorie de Rouen et sa numérisation*, «Revue XYZ», 29-32.  
Varea S., Lemerle J.B. 2011, *La cabeza maorí y su digitalización*, in *Arqueología 2.0, Actos del coloquio (Sevilla 2011)*.

#### ABSTRACT

AFT is an expert land survey and topography office situated in the urban area of Rouen (Haute-Normandie). For about six years, its land surveyor and photogrammetric activities have allowed it to work on archaeological sites. A new department, named AFT Archaeology, is now in charge of taking topographical surveys in order to produce 3D models of the archaeological sites and historical monuments. First, in this article we are going to describe the laser scan techniques, the kind of laser used and the information processing. Then, we are going to illustrate some applications on archaeological and historical sites and also some exceptional objects we scanned. These examples of what we are doing will be illustrated by a 3D model presentation, section and map. In a few words, this little introduction will aim to show the interest of laser digitisation and 3D modelling techniques: perfect digital copy, extremely accurate and exhaustive (up to 1/10<sup>e</sup> mm of precision), study support, evaluation support (3D presentation in museography, pictures for archaeological excavation reports, etc).

<sup>2</sup> <http://www.youtube.com/watch?v=IOWtWflyDDU>. Quelques exemples de modèles 3D: <http://aftopo.blogspot.fr/>; <http://www.facebook.com/pages/AFT-Arch%C3%A9ologie/144510005615682>.

## NUMÉRISATION 3D DU SITE DE SAINT-SYMÉON (SYRIE)

### 1. Contexte

Le Massif Calcaire du Nord de la Syrie est à la fois une entité paysagère karstique très marquée et un conservatoire archéologique exceptionnel grâce à l'état des vestiges remontant à l'antiquité tardive et parmi lesquels le sanctuaire de Saint-Syméon fait figure de proue. Construit après la mort du premier stylite, survenue en 459, pour enchâsser la colonne de 16 m de haut sur laquelle le saint a vécu plusieurs décennies, le monument offre la particularité de conjuguer le dessin d'un grand projet impérial financé par l'empereur Léon, puis son successeur Zénon, et les techniques locales de construction très inventives fondées sur l'exploitation optimisée des matériaux abondants sur place: pierre, terre et bois d'œuvre.

L'analyse de l'architecture du monument est, conjointement à l'étude de la culture matérielle au temps du pèlerinage et à celle du paléoenvironnement, un objectif principal de recherche affiché par la mission, notamment auprès de la commission des fouilles du Ministère des affaires étrangères et de l'unité mixte de recherche Orient & Méditerranée qui soutiennent le projet. L'analyse des vestiges est conduite en trois phases successives d'échelle décroissante:

- Le relevé des structures en place;
- L'étude des éboulis;
- La fouille stratigraphique.

À Saint-Syméon, les murs ont été presque tous montés selon la technique fine et prisée du gros appareil orthogonal simple à joints vifs. Ils ont été par la suite disloqués ou effondrés par les séismes, fréquents dans cette partie du monde, à la charnière entre l'Afrique et l'Asie. Ils conservent les empreintes des éléments de second œuvre: trous d'encastrement de poutres, scellements, etc. qui permettent déjà, au seul examen des vestiges en élévation, d'émettre des hypothèses de restitution correspondant aux différentes phases d'utilisation. Il s'agit d'une architecture d'empilement où les fonctions statiques sont soulignées, en paroi extérieure, celle de présentation, par une modénature assez canonique dans la séquence des éléments de profil, ce qui permet des rapprochements chronologiques et géographiques, mais souvent fantaisiste dans les dimensions, les proportions et l'exécution des détails. Si les usages locaux privilégient pour le franchissement des portées l'architrave, le chantier de Saint-Syméon a vu fleurir la renaissance de formules plus sophistiquées d'archivoltes et de plate-bandes appareillées (Fig. 1).

Fig. 1 – Façade Nord de la basilique Nord du *martyrion* cruciforme de Saint-Syméon.

## 2. Les structures en place

La mission archéologique française lancée sur ce site en 1980 sous la direction de Jean-Pierre Sodini a hérité d'une documentation graphique constituée essentiellement de plans réalisés entre les années 1935 et 1960. Les élévations du *martyrion* cruciforme ont fait l'objet dès la première campagne de relevés photogrammétriques aboutissant à la production d'une série de 24 planches à l'échelle de 1/20<sup>e</sup>, complétées manuellement pour les parties cachées. Les conditions de prise de vue n'ont malheureusement pas permis d'atteindre l'exactitude attendue à cette échelle ni d'incorporer ces dessins dans un système géo-référencé, c'est à dire les rendre utilisables pour l'élaboration d'une maquette. Il s'est également avéré que les couples n'étaient pas ré-exploitable. Il a fallu admettre, à l'issue d'une mission réalisée en 2001 avec Yves Egels et Daniel Schelstraete de l'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG), que la construction d'un système topométrique approprié était nécessaire. Cependant, grâce aux avancées technologiques de la photographie numérique, on pouvait immédiatement relancer une campagne de relevés photogrammétriques sans ignorer que la production des restitutions, à l'aide de l'application Poivillier E, durerait longtemps. Un programme général de topométrie du seul *martyrion* a été lancé en 2002 mais il a été difficile de résister à la tentation d'élargir le périmètre d'étude à l'ensemble du sanctuaire: monastère, baptistère et même l'arc triomphal qui se trouve

semble de points de référence a été déterminé progressivement entre 2003 et 2008. Les coordonnées X et Y ont été calculées dans un système en projection stéréographique centré sur un point du site, orienté sur le Nord astronomique, avec une échelle de distance correspondant aux mesures sur le terrain, et des altitudes fournies par rapport au niveau de la mer. Un outil de transformation permet de convertir des mesures entre le système WGS84, le système topographique syrien et le système Saint-Syméon. Les mesures topométriques ont été regroupées sur une base de données liée au dessin général du site.

En 2004, Yves Egels a proposé de compléter la photogrammétrie par des relevés au scanner 3D longue distance à différence de phase pour les volumes complexes, les absides et absidioles notamment. En dépit des difficultés locales multiples (pannes d'électricité, température ambiante élevée, etc.) et techniques (scan des cibles), la quasi-totalité du *martyrion* a pu être scannée au cours d'une mission de deux semaines à Pâques. Il a suffi d'une mission complémentaire en juillet pour achever la couverture totale de ce bâtiment et commencer le scan d'autres édifices du site. Dans le programme de la mission Saint-Syméon deuxième génération qui portait non seulement sur le sanctuaire mais l'ensemble du village, figurait en bonne place le plan de numérisation 3D des édifices majeurs grâce à la mise à disposition par l'unité mixte de recherche 3495, Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine, de son expertise et de ses machines:

- 2007: baptistère, chapelle Sud et bâtiments attenants, secteur de l'arc triomphal (Julie Deléglise) dont la fouille est conduite par Dominique Pieri;
- 2008: mur d'enceinte et "Résidence" (Julie Deléglise et Micheline Kurdy);
- 2009: citernes, couvent du sanctuaire, couvent Sud-Est (Matthieu Dévaux, Micheline Kurdy, Lucien Morange, Jean-Baptiste Caverne);
- 2010: couvents Nord-Ouest et Sud-Ouest, église Nord (Micheline Kurdy, Mathieu Audern).

Les opérations de scanner et de topométrie étaient intimement liées. Le programme devait être complété en été 2011 avec une machine encore plus rapide et surtout dotée de batteries permettant une totale autonomie. Cette ultime série a dû être reportée à plus tard.

À partir de la somme des données métriques géoréférencées de l'ensemble bâti et de certains objets on a pu produire, grâce à l'outil Cumulus (Yves Egels), avec un degré élevé de précision, toutes les représentations en plan, coupes et élévations pour décrire l'existant et émettre des hypothèses sur les états antérieurs. Par ailleurs on a eu la possibilité, grâce à l'outil NUBES (Livio de Luca), de traiter:

- Le regroupement des nuages de points pour reconstituer les volumes selon des critères définis, chronologiques par exemple (Fig. 2);

Fig. 2 – Maquette de l'état actuel du *martyrion* cruciforme de Saint-Syméon, étapes de la construction.

Fig. 3 – Schéma méthodologique, trois cas d'étude à des échelles diverses du site: *martyrion*, citernes et cuve baptismale.

- La représentation 3D des formes irrégulières (Fig. 3) (relevé et réalisation Matthieu Dévaux);
- La formalisation en 3D des unités stratigraphiques.

### 3. Étude des blocs errants

Le *martyrion* cruciforme a été déblayé après 12<sup>e</sup> guerre mondiale. Avant d'être rangé en parkings, chaque bloc a été numéroté (gravé) et localisé dans sa position de chute sur des plans qui ont été conservés pour partie à l'Institut français d'archéologie de Beyrouth (actuel Institut Français du Proche-Orient) et pour l'autre au musée national d'Alep. Ils sont rangés à touche-touche et souvent difficiles d'accès. Pour le stock correspondant aux travaux d'après-guerre, plus de trois mille blocs ont été retrouvés et analysés. Près de deux mille ont été égarés ou réutilisés (en parement du mur d'enceinte notamment ou en remblai). Plus de deux mille ont été étudiés par la suite et déplacés par nos soins à l'Ouest de la basilique Ouest. Les blocs sont très souvent à l'état fragmentaire. On a constaté que, compte tenu des lacunes, très peu de sous-groupes de blocs sont directement assemblables. On a pu cependant les inventorier de manière à dénombrer des familles structurales. Chaque bloc, dont on connaît ou on suppose en cas d'incertitude la position architectonique, est documenté dans les domaines suivants:

- Immatriculation (n°, place du n°, fragmentation, doublons);
- Dimensions de base;
- Description de formes complémentaires;
- Géolocalisation (lieu de chute, dépôt actuel, unité stratigraphique);
- Identification (fonction, structure);
- Documentation (bibliographie, iconographie, etc.).

Les blocs se trouvent très souvent en surface comme si les tremblements de terre les plus catastrophiques étaient survenus bien après l'abandon du site mais dans certains cas, comme celui qui a été rencontré aux thermes (chantier conduit par Pierre-Marie Blanc), une série de blocs éboulés a été sommairement rangée à terre à un niveau inférieur de la stratigraphie et est associée à une unité stratigraphique.

### 4. Anastylose

Le relevé des structures en place et l'étude des blocs à terre contribuent à l'anastylose numérique qui se conçoit globalement en volume.

Des requêtes sur des séries incomplètes de blocs à terre de l'octogone ont permis, grâce à la localisation des points de chute et des critères de sélection comme l'épaisseur et le type de décor, de proposer, avec un degré mesuré de

certitude, la restitution des parties manquantes pour le tambour octogonal du *martyrion* dans sa conception initiale.

La numérisation a permis d'assurer, pour les secteurs étudiés, la quasi-complétude de la documentation métrique des élévations conservées, de ne plus limiter les mesures à la préparation d'une série prédéfinie de coupes et élévations, d'intégrer tous les écarts et déformations par rapport aux formes idéales et de disposer en permanence du monument virtuel. Plus que la simple dématérialisation des supports documentaires, la numérisation des objets constitue un enrichissement qualitatif et quantitatif des mesures.

La mission de Saint-Syméon a largement bénéficié des coopérations formelles et informelles avec l'ENSG et le MAP qui se poursuivent maintenant pour le traitement des données amassées. Nous restons attachés à la conjugaison des recherches, archéologique et technologiques en matière de capture, d'archivage numérique et de représentation en architecture. La production de nuages de points par corrélation dense d'images devait être implémentée sur le site en 2011 au cours de la campagne qui a malheureusement dû être annulée.

L'interopérabilité des systèmes d'information graphiques progresse: les nuages de points géoréférencés peuvent maintenant être insérés dans les dessins vectoriels et servir d'appui à la création de volumes restitués. L'évolution rapide des outils de capture et de traitement engendre la création d'une multiplicité de formats de données dont on ignore la pérennité alors que la dématérialisation du fonds documentaire et l'anastylose numérique permettent de travailler dans l'espace virtuel, de conserver les vestiges dans leur authenticité et d'éviter des restaurations le plus souvent inopportunes.

Partant de simples "expériences en matière de relevés architecturaux et archéologiques", nous sommes passés à une phase industrielle du relevé 3D et c'est ce qui a conduit Micheline Kurdy à préparer une thèse sur les apports des outils numériques et le récolement d'informations archéologiques et architecturales en 3D.

Les études architecturales à Saint-Syméon sont menées en fonction de l'hétérogénéité du site. Diverses méthodes d'acquisition ont été appliquées sur chaque cas en tenant compte de différents facteurs. Jusqu'où les outils numériques deviennent-ils nécessaires et indispensables? Comment pouvons-nous bénéficier au maximum des possibilités qu'ils offrent pour la conservation, l'analyse et le partage des connaissances?

Cette présentation aborde tout d'abord la méthodologie de la reconstruction 3D basée sur le croisement des besoins archéologiques et les outils numériques. Elle a été appliquée à différentes parties du site et, notamment, sur un bâtiment particulier, la "Résidence", où une étude détaillée a été réalisée selon un processus complet: relevé, étude archéologique, reconstruction 3D et représentation informationnelle.

## 5. La méthodologie

La méthodologie a été appliquée sur les divers secteurs du site comme terrain d'expérimentation avec le support des outils numériques. L'objectif principal n'est pas la performance de visualisation, mais l'amélioration de l'analyse architecturale par l'application d'outils de visualisation 3D.

Dans le travail archéologique quelle que soit l'échelle de l'objet, un processus de plusieurs étapes s'impose. On a distingué quatre étapes principales et défini les relations entre elles, les différents outils numériques et les conditions:

- Le relevé architectural pour documenter, positionner et déterminer l'objet étudié;
- La modélisation tridimensionnelle virtuelle de l'état existant comme une base pour les études accompagnées d'enrichissements visuels;
- L'étude et les analyses de l'objet pour la réalisation virtuelle des réflexions et des hypothèses proposées;
- L'exploitation des données et leur présentation informationnelle, c'est l'objectif final et le résultat souhaité de l'étude.

Deux pôles ont un rôle important pour le choix de la stratégie: d'un côté les outils, leurs conditions d'utilisation et la relation entre les différentes étapes; de l'autre, les caractéristiques de l'objet et l'objectif de recherche. La morphologie de l'objet impose des conditions importantes dans la première étape, le relevé architectural. L'environnement de l'objet étudié conditionne également le relevé. L'objectif de l'étude influe sur le processus mené depuis le relevé jusqu'à la représentation finale. D'autres conditions générales aident à définir la méthode, comme la durée de l'acquisition, le contexte climatique, des conditions spéciales du site (politiques ou autres).

Dans une observation plus détaillée, nous pouvons classer les outils numériques en deux catégories principales: la photogrammétrie et la lasergrammétrie où chaque acquisition propose diverses techniques et applications. Elles se croisent tout au long du processus métier.

En appliquant notre méthodologie sur divers secteurs du site, une stratégie adaptée à chacun d'eux a été suivie. Trois cas, pris à des échelles différentes, illustrent la méthodologie (Fig. 3):

- La cuve baptismale pour l'étude des blocs sculptés, pour lesquels une campagne de relevés détaillés a été menée en 2008 avec un scanner de triangulation optique; une modélisation automatique a été faite à partir des nuages denses de points et une anastylose virtuelle a été proposée.
- Les citernes souterraines pour l'étude du système de récupération des eaux pluviales; une mission de relevés a été effectuée en 2009 avec un scanner à différences de phases pour obtenir des nuages de points détaillés, suivis d'une modélisation automatique en vue d'une étude comparative.

Fig. 4 – Maquettes de l'état actuel et de l'état restitué de la "Résidence".

– Le *martyrion* comme édifice majeur, étudié au cours de plusieurs campagnes; un scanner à temps de vols a permis un relevé complet du monument et une reconstruction géométrique a été réalisée selon la chronologie du chantier avec une restitution hypothétique des parties manquantes (Fig. 3).

## 6. Processus de travail sur la "Résidence"

Basée sur les expériences précédentes, une étude approfondie a été conduite sur la "Résidence", édifice remarquable, situé dans le village de Télanissos (actuel Deir Sem'an) au Sud-Ouest du sanctuaire. Il s'agit d'un bâtiment civil du VI<sup>e</sup> siècle, bien préservé, composé d'une entrée principale, d'une cour centrale et d'un complexe de bâtiments. En s'appuyant sur la méthodologie proposée, on présente une combinaison de plusieurs techniques et outils utilisés (Fig. 4).

### 6.1 *Le relevé architectural*

Pendant la campagne de 2008, une étude architecturale a été réalisée en se concentrant sur trois objectifs principaux:

- Collecte et rassemblement des informations métriques et sur les formes architecturales; un scanner de longue distance, avec un système de temps de vols, a été utilisé pour un relevé laser de la totalité du bâtiment restant. 250 millions de points ont été acquis et géo-référencés dans le système topographique de Saint-Syméon avec une résolution moyenne d'un point tous les 5 mm.
- Acquisition photographique, parallèlement, pour l'enrichissement visuel et l'aspect réel: des appareils photos numériques, 12 méga-pixels avec des lentilles (18 mm-70 mm), ont été utilisés pour couvrir la totalité des surfaces des parties en place de manière à les appliquer sur le modèle 3D et à compléter les lacunes présentées par les nuages de points.

- Acquisition photographique convergente pour photo-modéliser les blocs sculptés et les parties détruites.

## 6.2 Reconstruction géométrique

Toutes les données recueillies au cours des différentes enquêtes ont été utilisées pour une reconstruction générale tridimensionnelle. Un traitement spécifique a été expérimenté pour chaque type d'entité:

- Une reconstruction géométrique a été réalisée en s'appuyant sur les nuages de points, par modélisation selon la logique pierre-à-pierre afin d'obtenir une maquette détaillée de l'ensemble comprenant les déplacements de blocs et les fissures en guise d'étape préparatoire pour l'analyse et l'étude morphologique.
- La photo-modélisation a été utilisée pour restituer les blocs dispersés et les intégrer dans le modèle général en utilisant le géo-référencement des nuages.

## 6.3 L'enrichissement virtuel

Afin de donner un aspect réaliste au modèle 3D et de compléter les détails invisibles, une couche d'information photographique a été projetée sur le modèle 3D. Les photographies acquises ont été orientées cartographiées sur les surfaces.

## 6.4 Analyse et étude

La reconstruction géométrique a été le point de départ pour l'analyse et le développement de l'anastylose virtuelle. Cette étape a été basée sur trois points principaux:

- L'étude systématique de la maquette de l'état actuel; la morphologie du bâtiment, les déplacements et les parties manquantes;
- L'étude des sources documentaires recueillies à ce sujet;
- La comparaison des caractéristiques avec celles des bâtiments similaires dans la région.

Une restitution hypothétique de la "Résidence" a été réalisée: il s'agissait d'un complexe riche autour d'une cour centrale, avec un bâtiment principal à trois niveaux dont le rez-de-chaussée était affecté à la production de l'huile d'olive (reste d'une meule), un bâtiment à deux niveaux au Sud-Est, correspondant à une auberge, et une entrée monumentale avec écurie.

## 6.5 L'exploitation de l'information et la représentation

Afin de recueillir l'ensemble des données, collectées et produites, nous avons utilisé le système d'information NUBES, une plate-forme intégrée pour décrire, analyser, documenter et diffuser des représentations numériques d'édifices patrimoniaux.

Ce système, avec ses annotations sémantiques architecturales, s'utilise non seulement pour la conservation et la compréhension du patrimoine mais aussi comme outil d'archivage. Il fournit le support privilégié pour la navigation et l'interaction avec les sources documentaires utilisées pour la restitution hypothétique du bâtiment. Il forme en outre pour les spécialistes une interface commune et collaborative avec sa description sémantique pour le travail analytique au sein d'une scène 3D. L'interface est accessible aux multi-utilisateurs à la fois pour consolider la base de données et enrichir le projet.

Des informations de plusieurs types pourraient être associées au modèle 3D (dimensionnelles, morphologiques, historiques et descriptives) et rendues accessibles par le web aux professionnels et au grand public. Ce système d'information est constitué d'une application web à trois composants:

- Une base de données, développée en MySQL, pour organiser les données du relevé, les représentations multiples issues de la modélisation 3D et les sources documentaires (iconographie 2D);
- Une scène 3D interactive développée en Virtools DEV permettant le téléchargement, la visualisation et la manipulation des représentations en 3D;
- Un ensemble de pages PHP qui facilite l'accès de l'utilisateur aux informations stockées et fournit les passerelles nécessaires pour le dialogue entre la scène 3D et la base de données.

Ce système a permis d'établir le lien entre toutes les connaissances 3D, 2D et écrites. Il s'agit d'un outil interactif que les architectes et archéologues peuvent utiliser afin d'analyser, qualifier et partager des informations

## 7. Conclusion

L'accent a été mis sur une approche analytique de diverses méthodes d'application dans différents cas d'étude, par un processus dynamique et conçu pour des multi-utilisateurs. L'objectif était de souligner le rôle des outils numériques et des techniques qui peuvent affecter tous les aspects des travaux archéologiques: relevés architecturaux, modélisation géométrique, restitution hypothétique et exploitation d'informations.

Nous avons abordé les limites et les perspectives. Les limites sont liées au très grand nombre de données que collectent les différentes techniques d'acquisition et qui rendent complexe la vision d'ensemble du site. La structuration sémantique permet de donner une réponse et de réaliser une représentation géométrique et architectonique du site. L'expérience tentée sur la "Résidence" concerne une partie restreinte du site. L'application de la méthode sur d'autres secteurs devrait permettre d'homogénéiser l'information sur la totalité du site.

Dans une perspective à plus long terme, elle pourrait être progressivement appliquée sur des sites similaires.

Jean-Luc Biscop

UMR 8167, Orient & Méditerranée, Paris

Micheline Kurdy

UMR 3495, Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine, Marseille

#### ABSTRACT

Despite the damage caused by earthquakes, the ruins of the Sanctuary of Saint-Syméon (Syria) still stand proudly in the landscape and constitute the distinct but complementary phases of the archaeological study of the monument. The French Archaeological Mission of Saint-Syméon-le-Stylite, carried out by the CNRS-UMR 8167 Orient et Méditerranée and largely funded by the Ministry of Foreign and European Affairs, has been committed to the 3D rendering of architectural drawings starting in the early 2000s, thanks to a partnership with the École Nationale des Sciences Géographiques. The 3D data acquired over the years give us an important platform on which to apply a working protocol established in the case of La Résidence, a civilian building in the village of Télanisos. A wide range of techniques was applied and used to create a digital model as a support for the navigation and the interactive management of documentary sources that have facilitated a hypothetical reconstruction of the building. The NUBES information system has been used to describe, analyse, document and share digital representations of this building. The main contribution of this work is the combination of archaeological assumptions with documentation methods, in a dynamic and multi-user perspective.

## APPLICATIONS 3D POUR LA CONTEXTUALISATION ET LE RELEVÉ D'ART EN GROTTTE ORNÉE

### 1. Introduction

Les applications 3D connaissent un développement croissant dans les recherches archéologiques. Dans le champ de la Préhistoire, les travaux dans les grottes ornées se situent en pointe pour l'utilisation des techniques d'enregistrement et de modélisation 3D. Ces dernières sont sources de données et supports déterminants pour répondre aux problématiques des études, de même que pour les aspects de conservation et de restitution.

À cet égard, des sites tels que Chauvet (Aujoulat *et al.* 2005), Lascaux, Angles sur l'Anglin (Pinçon *et al.* 2012), Altamira, ou plus récemment Font de Gaume ou Cussac intègrent de véritables programmes d'enregistrement et traitement 3D. Si l'essentiel des premiers travaux ont visé à la reconstitution des volumes souterrains, de nouvelles pistes apparaissent depuis peu. Elles vont de pair avec l'utilisation de méthodes d'enregistrement et d'outils logiciels adaptés aux objectifs définis par les chercheurs.

À côté des scanners/lasers, la photogrammétrie retrouve peu à peu une place parmi les programmes de recherche, près de 30 ans après les dernières tentatives d'applications. Les essais effectués notamment à Pech Merle (Lorblanchet 1981) n'avaient à l'époque pas produit de supports efficaces, les rendus en courbe de niveau étant peu parlants sur le plan visuel, et peu déterminants pour la compréhension des figures. Toutefois, les nouvelles applications logicielles et le développement de la méthode par corrélation de masse replacent la photogrammétrie et ses outils au cœur des applications de recherche dans le domaine de l'art préhistorique.

### 2. Mise en œuvre de nouveaux outils et approches 3D

À ce titre, dans le cadre d'un programme de recherche interdisciplinaire sur les méthodes et analyses appliquées à l'art préhistorique, le programme MADAPCA<sup>1</sup>, nous avons mis en œuvre des enregistrements 3D visant à deux objectifs, la numérisation des volumes pour la contextualisation archéologique et la conservation, dans la grotte Blanchard (Robert, Egels *et al.* à paraître), et la numérisation des gravures à haute résolution à Rouffignac (Robert, Pierrot-Deseilligny *et al.* à paraître).

<sup>1</sup> MicroAnalyses et Datations de l'Art Préhistorique dans son Contexte Archéologique, programme subventionné par l'Agence Nationale de la Recherche, coordonnée par Patrick Paillet (Museum).

Ce travail a associé préhistoriens, spécialistes de photogrammétrie, photographes et topographes, de plusieurs laboratoires et centres de recherches. Il a été conduit dans le cadre de collaborations visant à combiner problématiques archéologiques et nouvelles méthodes d'analyse. Ainsi nos objectifs alliaient à la fois le souci de la conservation, l'application de procédés techniques inédits dans ce milieu, et la création de supports pour la recherche.

Les terrains d'application ont été deux grottes magdaléniennes ( $\approx 17-12\ 000$  BP) qui présentent des problématiques distinctes, dans deux contextes extrêmes, de l'infiniment petit à l'infiniment grand: Blanchard (Indre) et Rouffignac (Dordogne).

À Blanchard, le site qui a initié notre démarche (Robert *et al.* 2012), l'objectif premier était la conservation puisque la grotte, située à quelques mètres seulement de la voie ferrée Paris-Toulouse, est directement exposée à des risques de fracturation de la roche. Toutefois cet objectif n'était pas le seul. Malgré sa taille modeste, ce site possède en effet un riche contexte archéologique, en particulier par ses nombreux objets fichés dans les parois (Peyroux, Cretin à paraître), associés à des ensembles de tracés, essentiellement gravés.

Nous voulions élaborer un modèle de la grotte qui soit directement texturé, dans lequel soient restitués aussi bien les volumes que les gravures, et dans lequel soient contextualisés avec précision toutes les données archéologiques et analytiques.

À Rouffignac, l'objectif était différent, puisqu'il visait dans le cas présent la numérisation des représentations pariétales. Les techniques actuelles permettent d'atteindre une résolution suffisante par les scanners (Burens *et al.* 2011), ce que nous voulions vérifier, en grotte, pour la photogrammétrie. Nous avons cherché à tester ses limites sur des panneaux gravés, avec des palimpsestes de différents types de tracés (gravures au doigt, à l'outil, tracés modernes, griffades de plusieurs animaux, etc.: Robert, Pierrot-Deseilligny *et al.* à paraître). Au-delà de la numérisation elle-même, la question se pose de son utilisation, en particulier pour l'appliquer à la préparation et à la réalisation de relevés d'art pariétal.

Dans les deux cas, notre volonté n'est pas seulement de créer un support 3D. Ce support doit s'intégrer dans une démarche de recherches à part entière, où il constitue un chaînon essentiel pour aller au-delà des méthodes et outils actuellement employés, et ouvrir de nouvelles perspectives pour les travaux menés en grotte ornée.

Nous voulons insister ici sur deux applications essentielles, la localisation 3D des données archéologiques et analytiques, à laquelle est associée un système d'interrogation, et la création de nouveaux supports haute résolution pour les relevés des représentations. Dans les deux axes, la photogrammétrie a joué un rôle prépondérant, intervenant à différentes étapes de ces recherches,

### 3. Croisement des données archéologiques et analytiques dans le modèle 3D de la grotte Blanchard

La grotte Blanchard, bien que l'une des plus petites cavités ornées dans l'univers paléolithique, rassemble des données archéologiques de nature diverses: gravures faites au silex, peintures, objets en os et en silex fichés dans ses parois, objets archéologiques au sol. Occupée au Magdalénien (plusieurs couches ont été distinguées par le docteur Jacques Allain), elle présente des témoignages de toutes ces activités présentes conjointement, fait rare dans les sites karstiques du Paléolithique supérieur.

Outre ses caractéristiques archéologiques, Blanchard pose un problème de conservation. En effet, la grotte est située tout près d'une voie ferrée très fréquentée, ce qui a pour conséquence de créer des vibrations susceptibles d'accentuer la fracturation naturelle des parois. Face à ce risque, il était nécessaire de disposer d'un support pérenne de ce site, même virtuel, en cas d'évolution du contexte souterrain. C'est le sens de la démarche initiée dans cette grotte, qui a conduit à un premier modèle 3D par scanner (Faro Photon 120/20). Au total, dix stations ont été effectuées, cinq dans la grotte, deux dans les puits d'accès et trois à l'extérieur.

Plusieurs imperfections sont apparues dans ce premier modèle, au niveau du recollement des stations comme du calage de la texture, nécessitant des corrections, notamment le calage de clichés photographiques issus d'une couverture indépendante de celle du modèle 3D (Robert, Vigears *et al.* 2012).

Grâce au logiciel Cumulus (développé par l'un d'entre nous, Yves Egels), et déjà utilisé pour le calage de la texture complémentaire, nous avons pu résoudre la question du calage entre les stations, par un remontage manuel basé sur la méthode de phototriangulation. Correspondant à l'aérottriangulation (terme utilisé pour le calage des images aériennes), essentielle en photogrammétrie, elle vise au calage général des images entre elles à partir de la couverture photographique, via des points homologues identifiés sur les images. Le procédé ici est le même, mais s'appuie sur les "images" de chaque station du scanner.

La phototriangulation s'est aussi révélée précieuse pour recalibrer les relevés graphiques sur le modèle 3D, via le programme Redresseur (créé par Yves Egels) (Fig. 1). En effet, au début des années 80, le relevé de l'ensemble des gravures de la paroi Nord-Est a été réalisé sur des polyanes, par une méthode de projection quasi-orthogonale (étude effectuée par l'un d'entre nous, Denis Vialou). Après des tentatives de calage direct sur des couvertures photos modernes, qui se sont révélées infructueuses en raison des divergences de géométrie des méthodes d'enregistrement, nous avons cherché à recalibrer certains de ces relevés sur le modèle 3D, en supposant que leur géométrie pouvait être assimilée à une perspective centrale à déterminer. Pour cela, des points de correspondance avec la 3D ont été identifiés sur les relevés, en particulier les lignes de fracture

Fig. 1 – Calage par phototriangulation sur Redresseur du relevé graphique de la paroi de la grotte Blanchard, par identification de points homologues avec le relevé 3D (docs Y. Egels, D. Vialou, D. Vigears, E. Robert).

Fig. 2 – Plan de la grotte Blanchard issu de la numérisation 3D de la grotte par la scanstation Leica, localisation des points de correspondance avec la topographie (docs. D. Schelstraete, Y. Egels, E. Boche, E. Robert).

et fissures naturelles relevées en bleu sur les polyanes. Cela a permis d'obtenir une visualisation inédite de relevés effectués en 2D, sur le modèle 3D.

Outre la numérisation avec le scan Faro, un autre modèle 3D a été effectué (Leica scanstation 2), destiné à corriger et compléter le premier, en particulier dans une zone étroite et basse difficile d'accès, que le premier scan n'avait pas enregistrée. Trois stations ont été faites dans la grotte, la première au seuil de l'entrée, la seconde au centre de la grotte, la troisième au début du laminoir. De plus, le géoréférencement a été assuré en parallèle via une station topo et un récepteur GPS extérieur<sup>2</sup>. C'est aussi grâce à cette numérisation que nous avons pu caler les données archéologiques enregistrées en parallèle par la topographie.

En effet, la saisie 3D de points remarquables dans la grotte (parmi lesquels d'anciens repères topographiques au sol ou au-dessus de la porte), préalablement enregistrés par la station topo Leica TCR 407, a permis le calage entre les deux réseaux de données dans le modèle 3D (Fig. 2).

La nouvelle topographie de la grotte (la précédente était incomplète) a notamment permis à trois d'entre nous (Eric Robert, Elisa Boche, Magali Peyroux) de situer avec précision les 28 emplacements d'objets fichés identifiés dans la grotte

<sup>2</sup> Nous tenons à remercier ici Daniel Schelstraete et Anathasios Georgantas (IGN) pour la numérisation 3D effectuée avec le Scan Leica à Blanchard.

Fig. 3 – Appel des données analytiques dans le relevé 3D par points de correspondance dans Cumulus (relevé graphique en haut, fiche sur les objets archéologiques en bas) (docs. Y. Egels, D. Vialou, M. Peyroux).

(Peyroux, Cretin à paraître) ainsi que les secteurs peints et gravés de la grotte, et ce sur la base de l'étude du dispositif pariétal de la cavité (Vialou 2004).

La précision des stations, la large couverture des enregistrements, le calage entre données topographiques et 3D sont autant d'éléments qui ont contribué à disposer d'un modèle numérique 3D fiable et complet, dans lequel intégrer l'ensemble des données archéologiques, mais aussi analytiques développées sur ce site: relevés graphiques, photographiques, fiches d'étude des objets, microanalyses, etc.

Les points références enregistrés par la station topographique, pour les objets fichés (28) comme pour les ensembles gravés et peints (50), ont été intégrés au modèle 3D via leurs coordonnées, calées sur une même base de référence établie sur les repères de la topographie de 2004 (repères au sol, ainsi que 4 "clous" répartis dans la grotte) par la station topo et par le scan Leica. Il suffit alors de les intégrer sous forme d'objets ponctuels dans les métadonnées de Cumulus pour qu'ils apparaissent dans le modèle 3D de la grotte.

Une fois cette intégration effectuée, un système d'interrogation (encore succinct) est mis en place, permettant de faire apparaître, pour les points identifiés dans le modèle, l'information correspondante, référencée par un lien hypertexte. Il peut s'agir de fiches techniques, photographies, relevés, etc., qui sont accessibles par l'outil de sélection de coordonnées 3D ou par le nom de l'objet (Fig. 3). Ainsi, on peut comparer la localisation spatiale des différentes données archéologiques (objets fichés et ensembles gravés ou peints), et accéder instantanément aux informations qui y sont associées.

La construction de ce modèle nous place dans la perspective d'un véritable Système d'Information Archéologique en 3 dimensions, qui constitue à la fois un support pérenne pour la conservation du site, un support de recherche (par exemple pour des analyses spatiales), et un support d'archives 3D pour l'ensemble des données analytiques obtenues dans la grotte.

#### 4. Vers de nouveaux relevés d'art préhistorique: les parois de Rouffignac

L'une des problématiques principales de la recherche en art préhistorique vise au relevé des peintures et gravures identifiées sur les parois. La réalisation de ces relevés implique aujourd'hui un enregistrement préalable via des photographies, sur lesquelles sont réalisés les relevés par l'intermédiaire de papier transparent type polyane ou rhodoïd. Le principal problème tient précisément dans la restitution du support avec le relevé des traits. Jusqu'à présent, la restitution n'intervient que par un traitement graphique sur logiciel (type Photoshop), sur la base de la photo et des lectures dans la grotte. La 3D offre une alternative précieuse pour mieux rendre les caractéristiques de la paroi, et ce à plusieurs niveaux.

Au niveau de la saisie tout d'abord. Si cette dernière est suffisamment précise, nous pouvons alors disposer d'un rendu détaillé des micro-volumes des parois, mais aussi de la profondeur des gravures.

Au niveau du traitement ensuite, en extrayant du modèle 3D de nouveaux documents pour le relevé d'art, destinés à faciliter leur calage sur le modèle.

Ce sont les démarches que nous avons entreprises sur plusieurs panneaux de la grotte de Rouffignac. La large panoplie des techniques utilisées pour les œuvres pariétales (gravure au doigt ou à l'outil en silex, dessin), les traces animales (griffades d'ours et de petits carnivores) et les données analytiques disponibles pour la comparaison (couvertures photos, relevés) constituaient en effet un cadre idéal, parmi les grottes ornées paléolithiques, à la mise en œuvre de ce processus analytique.

Nous avons réalisé la photogrammétrie de deux panneaux gravés de Rouffignac: le panneau du Patriarce (autour de la représentation du mammoth 206), et le panneau de la Voie Sacrée (au niveau du tectiforme 29). Avec leurs propriétés respectives, ils représentent un éventail représentatif des caractéristiques de la grotte de Rouffignac, et au-delà, de la plupart des difficultés et situations susceptibles de se présenter dans les grottes ornées. On y retrouve les différents types de gravures présents à Rouffignac: gravure au doigt, au silex (burin), à la spatule, à l'outil métallique pour des traces modernes, mais aussi des griffades animales de différents gabarits (Plassard 1999).

Pour réaliser la photogrammétrie des panneaux, nous avons procédé à un enregistrement exhaustif par prises de vue successives, avec un recouvrement de deux tiers entre chaque image. Ces prises de vues ont été effectuées au moyen d'appareils photos Reflex calibrés. Plusieurs objectifs ont été employés, à des distances différentes, leur combinaison déterminant la profondeur de la gravure que nous voulions enregistrer. Le niveau de résolution obtenu a varié entre 50 et 500 microns, selon le panneau numérisé et le type de gravures.

La modélisation s'est fait ensuite en deux phases, selon un processus défini (Pierrot-Deseilligny, Clery 2011).

La première (la phototriangulation, réalisée par le module APERO) permet de reconstituer la configuration de la prise de vues (orientation et position de la caméra). Elle repose sur la reconnaissance de correspondances entre points caractéristiques entre chaque cliché. Le calcul des points de correspondance s'appuie aujourd'hui sur un calcul automatique via des algorithmes préétablis (du type détecteur SIFT, le plus couramment employé actuellement).

La seconde phase permet de créer un modèle 3D géométriquement fidèle de la scène par un algorithme de corrélation dense multi-image (via la recherche de l'homologue de chaque pixel sur toutes les images qui le voient, réalisée par le module MICMAC).

L'éclairage doit rester homogène et constant d'une prise de vue à l'autre et au cours des différentes couvertures (qu'il s'agisse de faire les clichés pour le calage général, la phototriangulation et la saisie des points). Pour cela, nous avons utilisé des sources froides, en l'espèce: des torches flash Broncolor, des flashes cobra Nikon et des lampes 60 LED. Chacune de ces sources a apporté des résultats probants au travers des tests effectués.

Au total, sur les deux panneaux que nous avons numérisés, nous sommes parvenus à avoir un modèle général enregistrant les détails des gravures faites au doigt et des principaux volumes, mais aussi nous sommes allés au-delà sur certains secteurs. Ainsi, à la base droite du Tectiforme 29, nous avons obtenu une restitution détaillée des gravures les plus fines, mais aussi des griffades de chauve-souris, correspondant à une résolution de quelques dizaines de microns (Robert, Pierrot-Deseilligny *et al.* à paraître). Nous avons ainsi pu avoir un véritable enregistrement en volume inédit et unique de griffades et gravures, visibles non plus seulement "à-plat", mais aussi dans toute leur profondeur.

Passé ce cap de la restitution directe en 3D, le second objectif vise l'exploitation du modèle 3D pour le relevé d'art. En effet, avec toutes ses qualités, la restitution 3D seule ne suffit pas à l'analyse des images, il faut en faire une lecture sélective des tracés, comprendre l'ordre de réalisation, les palimpsestes, rendre le geste du graveur, etc., autant d'aspects que la 3D ne permet pas "stricto-sensu" et pour lesquels le relevé manuel, traduction de la lecture et de l'analyse du chercheur, reste déterminant.

Au vu des contraintes que posent les traditionnels supports photos pour effectuer les relevés, nous souhaitions tester la possibilité de corrélation sur le modèle 3D. Avec l'exemple de Blanchard, nous avons pu vérifier que c'était possible, mais problématique lorsque le relevé est réalisé selon un procédé indépendant et divergent de la numérisation 3D. Des décalages restent présents, et offrent une image déformée du relevé. L'objectif est donc à présent de partir du modèle 3D pour obtenir le support sur lequel effectuer le relevé manuel, et ainsi faciliter le recalage a posteriori.

Nous avons donc utilisé la capture photogrammétrique du panneau du Patriarce, pour expérimenter le procédé. L'enregistrement du panneau s'est fait selon un découpage en 12 segments, chacun photographié de 6 positions différentes, le tout formant une panoramique apportant une information équivalente à une caméra très haute résolution (plus de 150 mega pixel). Pour l'éclairage, deux flashes cobras placés de manière oblique par rapport à la paroi. À l'opposé l'un de l'autre, ils permettaient ainsi un éclairage semi-rasant sans ombres (Fig. 4).

Ces 12 segments, obtenus dans le même référentiel, ont chacun fourni un modèle 3D. Le fort recouvrement entre chaque cliché et l'éclairage semi-rasant a permis d'obtenir de très nombreux points de correspondance iden-

Fig. 4 - Photogrammétrie du panneau du Patriarce, couverture photo à gauche, calage des points homologues en haut à droite, rendu ombré sur Meshlab en bas à droite (docs. E.Robert, M. Pierrot-Deseilligny).

tifiable (par exemple sur la tête du mammoth), offrant ainsi une résolution importante de l'image.

Les 12 modèles sont "naturellement" juxtaposables et cohérents grâce à la phototriangulation. L'assemblage ainsi obtenu a permis d'illustrer les caractéristiques du volume de la paroi et les détails des différents types de gravures et tracés existant. On distingue nettement les tracés gravés au silex du patriarce, la technique à la spatule spécifique des défenses, le tracé au doigt du rhinocéros 205 ou celui estompé du mammoth 206, et toutes les griffades animales qui parsèment la base du panneau (Fig. 5).

Fort de ces détails, nous avons extrait via le logiciel Cumulus une orthophotographie du panneau. C'est sur cette projection orthogonale de l'image qu'est réalisé le relevé, alors que les cartes de profondeur qui lui sont associées permettent le recalage définitif du modèle.

Fig. 5 – Restitution photogrammétrique du mammoth du Patriarce et relevé infographique sur orthophotographie (docs. M. Pierrot-Deseilligny, Y. Egels, E. Robert, S. Petrognani).

Sur la base de cette orthophotographie, on réalise le relevé. Pour les besoins de la méthode, il a ici été réalisé exceptionnellement sur ordinateur<sup>3</sup>, mais le principe fonctionne aussi avec l'approche plus classique de relevé sur polyane, calé sur l'orthophoto imprimée, puis scanné ensuite. Dans le cas présent, notre relevé infographique visait à distinguer les différentes représentations et techniques par des codes couleurs différents. Il ne s'agissait pas tant de faire une lecture détaillée du panneau que de tester la validité de la méthode.

Une fois le relevé effectué, le recalage sur le modèle 3D est trivial, puisque la géométrie du document est celle de l'orthophoto, qui est connue par fabrication. Deux rendus sont possibles: reprojection comme une texture

<sup>3</sup> Nous remercions ici Stéphane Petrognani (UMR 7041 ArScAn) qui a réalisé le relevé infographique du panneau selon les critères particuliers que nous avons fixés.

(Fig. 5), selon le procédé utilisé à Blanchard, ou bien passer directement le dessin vectoriel en 3D par le biais de la carte de profondeur, ce qui sera sans doute plus approprié pour des analyses spatiales. Nous avons opté ici pour la reprojection, méthode la plus simple permettant d'illustrer le procédé. Le résultat offre un calage précis et direct du relevé sur le modèle, et donc une véritable dimension de profondeur à la lecture analytique.

La dernière possibilité de relevé est sa réalisation directement sur le modèle 3D, sur ordinateur. Parmi d'autres, le programme Habillage (développé par Yves Egels), permet d'effectuer cette tâche. Toutefois, l'impossibilité d'adapter finement le tracé avec les outils informatiques, même avec une excellente palette graphique, ne permet pas de retenir pour l'instant ce procédé.

Quelle que soit la méthode employée, elle ouvre des opportunités nouvelles dans la recherche en art, en permettant d'envisager, déjà, de véritables relevés 3D des parois des grottes, et combiner ainsi la lecture analytique des images avec leur restitution volumétrique complète. Cet art retrouverait ainsi dans sa restitution scientifique les trois dimensions qui le composent naturellement à l'origine.

## 5. Les supports 3D, quelle place dans l'avenir de la recherche en art?

Au travers des recherches et applications menées ces dernières années dans le cadre de MADAPCA, nous avons pu expérimenter non seulement les techniques de numérisation, mais aussi travailler sur les applications des outils 3D. Notre démarche, renforcée par les résultats obtenus, montre à quel point les supports 3D, au-delà de l'aspect "esthétique" parfois critiqué, au-delà des apports sur la conservation et l'archivage des volumes, sont amenés à intégrer pleinement de nouvelles perspectives de recherches archéologiques, et précisément dans le contextes particulier des grottes ornées.

Qu'il s'agisse de la contextualisation des restes archéologiques associés (œuvres graphiques comme objets en matière dure minérale ou animale), des analyses sur la répartition spatiale et dans les volumes, ou de nouveaux outils pour le relevé des représentations, la 3D peut intervenir directement dans le processus d'analyse des grottes ornées.

La photogrammétrie, par l'ensemble de ses caractéristiques (techniques et logicielles) offre des opportunités nombreuses et variées. Avec peu de nuisances, cette méthodologie est adaptable à des objectifs divers, efficace à différentes échelles: restitution des volumes, enregistrement des gravures et traces, lecture des palimpsestes, etc. Si d'autres applications restent à développer, notamment pour des analyses technologiques et tracéologiques (mesures, profils de traits, stéréorestitution, etc.), la photogrammétrie apparaît d'ores et déjà opérationnelle en grotte, et combinable avec d'autres méthodes (topographie, scanners-lasers, etc.).

Un des objectifs déterminant pour la recherche en art, car il répond aux besoins actuels de la discipline, sera de définir et créer de véritables "Systèmes d'Interrogations Spatiales pour l'Archéologie" sur la base de la 3D, intégrant toutes les données, graphiques, archéologiques, morphologiques, analytiques, etc., tel que nous avons commencé à l'élaborer à Blanchard.

Les applications présentées ici correspondent aux besoins des recherches en art préhistorique. Fruit de la collaboration et des échanges entre photogrammètres et archéologues, elles témoignent à la fois de l'efficacité du dialogue interdisciplinaire, mais surtout des ouvertures nouvelles qu'offrent les modèles 3D.

Pour l'étude des représentations préhistoriques, la construction d'applications 3D inédites s'avère donc un facteur déterminant dans nos démarches, pour appréhender et restituer l'ensemble des démarches et des choix qui ont conduit à la création des dispositifs ornés paléolithiques.

Eric Robert

Muséum National d'Histoire Naturelle  
Département de Préhistoire  
UMR 7194, Paris

Yves Egels

Institut Géographique National,  
Ecole Nationale des Sciences Géographiques, IGN - ENSG, Marne-la-Vallée

Elisa Boche

Centre National de Préhistoire, Périgueux

Magali Peyroux

PACEA UMR 5199  
Université Bordeaux 1, Bordeaux

Denis Vialou, Patrick Paillet  
Muséum National d'Histoire Naturelle  
Département de Préhistoire  
UMR 7194, Paris

Daniel Vigears

Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France  
C2RMF - UMR171 CNRS, Paris

## BIBLIOGRAPHIE

- Aujoulat N., Perazio G., Faverge D., Peral F. 2005, *Contribution de la saisie tridimensionnelle à l'étude de l'art pariétal et de son contexte physique*, «Bulletin de la Société Préhistorique Française», 102, 1, 189-197.
- Burens A., Grussenmeyer P., Guillemin S., Carozza L., Bourrillon R., Petrognani S. 2011, *Nu-mérisation 3D de la grotte des Fraux (Saint-Martin de Fressengeas, Dordogne, France): approche multiscalaire*, in Jaillet, Ployon, Villemin 2011, 183-190.
- Egels Y. 2011, *La photogrammétrie, principes généraux et terminologie*, in Jaillet, Ployon, Villemin 2011, 41-50.

- Jaillet S., Ployon E., Villemin T. 2011, *Images et modèles 3D en milieux naturels*, Chambéry, Edytem, 12.
- Lorblanchet M. 1981, *Les dessins noirs du Pech Merle*, in *Congrès Préhistorique de France*, 21, Montauban-Cahors, Paris, Société Préhistorique française, 178-207.
- Paillet P. (ed.) en préparation, *Les arts de la Préhistoire: micro-analyses, mises en contextes et conservation*, in PALEO, n° special.
- Peyroux M., Cretin C. (à paraître), *Les objets fichés de la grotte Blanchard (Saint-Marcel, Indre)*, in Paillet (en préparation).
- Pierrot-Deseilligny M., Clery I. 2011, *Evolutions récentes en photogrammétrie et modélisation 3D par photo des milieux naturels*, in Jaillet, Ployon, Villemin 2011, pp. 51-66.
- Pincon G., Fuentes O., Barre R., Auber O., Hamon G. 2012, *De la frise magdalénienne in situ ... au centre d'interprétation du Roc-aux-Sorciers: l'usage de la 3D*, «In Situ» (<http://insitu.revues.org/6672>); DOI: 10.4000/insitu.6672.
- Plassard J. 1999, *Rouffignac, le sanctuaire des mammouths*, Paris, Le Seuil, 96.
- Ployon E., Sadier B., Delannoy J-J., Jaillet S., Monney J., Boche E., Geneste J-M. 2012, *Le SIG comme outil fédérateur de recherche interdisciplinaire: application à la grotte Chauvet-Pont d'Arc*, in F. Giligny et al., *Actes des 2<sup>èmes</sup> Journées d'Informatique et Archéologie de Paris - JIAP 2010*, «Archeologia e Calcolatori», Suppl. 3, 97-112.
- Robert E. 2011, *Nouvel outil pour le relevé des gravures paléolithiques et de leur contexte: l'apport de la photogrammétrie*, in E. Lopez-Montalvo, M. Sabastian Lopez, *El legado artistico de las sociedades prehistoricas, nuevos paradigmas de analisis y documentación*, Zaragoza, Universidad de Zaragoza, 151-153.
- Robert E., Vigears D., Melard N., Paillet P., Vialou D., Egels Y. 2012, *L'apport de la 3D dans l'art préhistorique: analyse et restitution des images et de leurs supports, exemples croisés des sites de Blanchard (la Garenne) et la Marche*, in F. Giligny et al., *Actes de 2<sup>èmes</sup> Journées d'Informatique et Archéologie de Paris - JIAP 2010*, «Archeologia e Calcolatori», Suppl. 3, 339-354.
- Robert E., Egels Y., Vigears D., Schelstraete D., Pierrot-Deseilligny M., Boche E., Vialou D. (à paraître), *La mise en contexte de la grotte Blanchard: l'apport des méthodes 3D*, in Paillet (en préparation).
- Robert E., Pierrot-Deseilligny M., Vigears D., Plassard J. Martin-Beaumont N., Plassard F., Egels Y. (à paraître), *La photogrammétrie à haute résolution en grotte ornée: numérisation des gravures de Rouffignac et Blanchard*, in Paillet (en preparation).
- Vialou D. 2004, *La grotte ornée Blanchard, Saint-Marcel (Indre)*, in *Archéologie du Val de Creuse en Berry*, «Bulletin de l'Association pour la Sauvegarde du Site Archéologique d'Argentomagus et Amis du Musée (ASSAAM)», Argenton sur Creuse, ASSAM, n° spécial, 69-76.

## Remerciements

Nous tenons ici à remercier chaleureusement Frédéric et Jean Plassard, qui ont permis et ont contribué à la mise en œuvre de la recherche sur les panneaux de Rouffignac, Madame Claudine Maria et l'ASSAAM pour nous avoir toujours facilité l'accès à la grotte Blanchard. Leur intérêt et leur disponibilité ont grandement contribué à la mise en œuvre des projets et des applications présentées ici.

## ABSTRACT

Among 3D tools, photogrammetry has received growing attention for the modeling of underground spaces. The flexibility of its implementation and the wide field that it can cover encourage its use for recording decorated walls and their contexts. As part of a developing program ANR microanalysis on prehistoric art, 3D photogrammetry modeling were carried out in caves in Blanchard (Indre, France) and Rouffignac (Dordogne, France). I make quickly reference at two examples which are developed in article: 1) the numbering and analysis of the condition of the walls and the engravings; 2) localization in 3D pointcloud of archaeological data (paintings, prints, objects of flint or bone stuck into the wall) and links with different kinds of information about them (type, descriptions, dimensions, drawing, etc.). These applications illustrate the possibilities offered by current 3D tools in the study of rock art, and are sometimes new ways for the study of prehistoric representations in their geomorphological and archaeological context.

## 3D EN KIT: DES SOLUTIONS POUR LA TRACÉOLOGIE ET AU-DELÀ

### 1. Introduction

Les possibilités de restitution tridimensionnelle arrivent sur le marché de l'électronique grand public au travers de photophones et de services en ligne de modélisation photogrammétrique destinés à amorcer le marché de l'impression 3D. Dans le même temps, les usages de la 3D à des fins de recherche archéologique demeurent peu fréquents, l'essentiel de l'investissement ayant porté sur des enjeux patrimoniaux et muséographiques. Dans le champ de l'archéologie préhistorique, les principaux développements ont concerné l'art pariétal et les milieux souterrains (e.g. Delannoy *et al.* 2012), dans une démarche plus topographique qu'analytique, à quelques rares exceptions (e.g. Pinçon *et al.* 2008; Fritz *et al.* 2010). Ceci s'explique par le coût important des moyens nécessaires lorsqu'il n'existait guère d'alternative à la lasergrammétrie. En laboratoire les moyens disponibles pour des restitutions infra-millimétriques étaient tout aussi coûteux et encore moins transportables, limitant d'autant les registres d'usage.

Grâce aux progrès constants de l'informatique, tant dans les puissances de calculs que les logiciels, une nouvelle gamme de solutions devient accessible à l'archéologue, plus flexibles et mieux adaptées à la diversité de ses terrains et de ses échelles d'analyse. Divers constructeurs ont mis à profit certaines de ces solutions pour proposer des instruments plus ou moins transportables d'un type nouveau, destinés aux observations macroscopiques sur site ou en atelier et intégrant des fonctions d'enregistrement et de modélisation tridimensionnelle, mais à des prix se chiffrant en dizaines de milliers d'euros: les "microscopes numériques".

Plusieurs laboratoires d'archéologie et certains décideurs se sont montrés sensibles aux capacités de tels microscopes, au point qu'un projet régional sur l'art paléolithique (APASAP) a récemment été réfuté faute d'intégrer dans ses demandes de moyens cet instrument que son rapporteur jugeait nécessaire. Il convient donc de faire le point sur les solutions alternatives qui s'ouvrent à l'archéologie.

Comme l'ont souligné E. Robert *et al.* (2012), les différentes échelles qui intéressent le préhistorien ne peuvent être couvertes par un seul instrument ni un seul principe. Selon que l'on souhaite restituer la totalité d'un réseau de galeries souterraines, les différentes étapes d'une fouille, le modelé d'une paroi ornée, le détail d'un trait de gravure ou d'une usure de tranchant, il convient d'identifier la technique appropriée, au risque sinon de devoir réviser ses exigences à la baisse ou d'être dans l'impossibilité d'opérer, en raison des

limites physiques du principe retenu, de la masse des données à traiter ou des contraintes matérielles de l'instrumentation. A ce titre, la tracéologie (discipline de l'archéologie portant sur les traces de fabrication et d'usage des objets mobiliers et immobiliers: Semenov 1964), qui couvre un large registre d'échelles dans des contextes variés, est un champ révélateur de cette diversité.

Si la scannographie laser demeure le moyen le plus rapide pour numériser de grands volumes de galerie, les procédés basés sur la mise en correspondance d'images photographiques sont mieux appropriés pour la restitution de détails aux différentes échelles d'observation, ainsi évidemment que dans tous les contextes où il est impossible d'apporter un scanner. Ils offrent plusieurs avantages: un coût d'achat et d'entretien 10 à 50 fois moindre, la dissociation des phases d'acquisition et traitement, donc l'accroissement à venir de la résolution des modèles à partir des mêmes séries de clichés par l'évolution des algorithmes de corrélation, la concordance des valeurs spatiales et chromatiques pour chaque point et donc l'inutilité de procéder à un enregistrement distinct pour texturer le modèle.

## 2. Principes en œuvre

La modélisation tridimensionnelle à partir d'une série de photographies repose sur deux principes différents selon l'échelle: la mise en correspondance automatique de détails homologues sur des clichés pris sous différents axes ou bien la combinaison des détails correspondants à chaque plan de netteté dans une séquence de clichés ordonnés sur un même axe. Le premier principe, connu sous le terme de photogrammétrie, requière de la profondeur de champ, afin d'avoir le maximum de recouvrement possible d'une image à l'autre, lequel est tributaire de l'étendue de la zone de netteté, tandis que le second, désigné par différents termes – compilation d'images, hyper focus, multifocus, zédification; image stacking, z-stacking, depth of field stacking, focal plane merging – donne des reconstructions d'autant plus résolues verticalement que la profondeur de champ est faible. C'est pourquoi, à l'exception du module Leica IC3D exploitant le principe de la stéréophotogrammétrie, tous les microscopes optiques à faible ou fort grossissement pourvus d'une capacité de restitution tridimensionnelle mettent en œuvre une translation verticale de l'objet au travers du plan de netteté (plan objet), y compris les microscopes confocaux dont le surcroît de résolution est obtenu par un balayage laser couplé à un sténopé en lieu de l'éclairage en lumière blanche.

La concrétisation de l'un et l'autre principe est aujourd'hui synonyme de technologie numérique. Si la photogrammétrie existe depuis un siècle et demi, elle était auparavant de mise en œuvre très lourde, les points devant être relevés visuellement un à un (Pierrot-Deseilligny, Clery 2011); sa forme

actuelle doit tout à l'informatique. Quant à la zédification, elle est née de la photographie numérique.

### 3. Notions d'optique

Le microscope "numérique" – ne pas confondre avec le microscope électronique – n'est qu'un système optique classique synchronisé à un dispositif d'imagerie numérique. Les caractéristiques proclamées par certains fabricants doivent plus aux lois du marketing qu'à celles de la physique, comme l'illustre les notices (KEYENCE\_vhx\_1000\_ku.pdf, KEYENCE 2010a, b) du KEYENCE VHX-1000 proclamant «Une grande plage de grossissement de 0x à 5000x/ Wide magnification range from 0x to 5000x» (p. 8) et prétendant couvrir les registres d'usage de la loupe binoculaire, du microscope métallographique et du microscope électronique à balayage. Sans entrer dans les différences structurelles qui distinguent fondamentalement les trois instruments et les types d'images qu'ils produisent, l'extravagance de la plage de grossissement annoncée appelle deux commentaires: un coefficient de grossissement nul équivaut à ne former aucune image, tandis qu'un grossissement de plusieurs milliers de fois est optiquement impossible (la plus courte longueur d'onde de la lumière visible ne discrimine pas de détails inférieurs à 0.3  $\mu\text{m}$  en observation à l'air). En réalité, les valeurs indiquées ne sont pas des grossissements mais des agrandissements. Il est d'ailleurs précisé ailleurs dans ces notices «que les *grossissements* sont donnés pour un affichage sur moniteur 15» (p. 28).

Le grossissement est le produit de l'objectif et il dépend de sa géométrie (Abramowitz *et al.* 2012; Snavely *et al.* 2012). Deux chiffres gravés sur le corps des objectifs de microscope permettent d'identifier immédiatement leur capacité: la puissance et l'ouverture numérique (laquelle détermine la résolution), par exemple 10x/0.25, 20x/0.40, 50x/0.75. Les autres valeurs correspondent à leur formule optique (selon la structure du microscope et la nature des objets analysés). La profondeur de champ étant inversement proportionnelle à la résolution et celle-ci augmentant avec le grossissement, les caractéristique de l'image sont fixées par l'objectif. Les oculaires ou tout autre élément optique placé après l'objectif ne sont que des relais; ils peuvent dégrader la résolution de l'image formée par celui-ci mais ne peuvent l'accroître (Plisson 1989). Les oculaires, habituellement d'une puissance de 10x, servent à agrandir cette image et à la projeter vers l'œil de sorte qu'elle soit perçue nette sans accommodation. Les objectifs de microscope les plus puissants destinés à l'examen des surfaces ont une puissance de 100x, mais leur profondeur de champ (inférieur au  $\mu\text{m}$ ) et leur distance de travail (inférieure au mm) sont si réduites qu'ils sont en pratique inexploitable pour l'examen des objets archéologiques. Les distances de travail indiquées pour les zooms des microscopes numériques correspondent en réalité à des objectifs d'une puissance bien moindre.

#### 4. Question d'échelle

Lorsqu'il est calculé d'après la surface d'affichage d'un écran, le coefficient d'agrandissement de l'objet observé apparaît d'autant plus important que le capteur du microscope numérique est minuscule (7.2×5.3 mm). Mais si l'on revient à un mode de mesure plus conforme, par rapport au plan d'image intermédiaire sur lequel se forme l'image produite par l'objectif (que relaient ensuite l'oculaire vers l'œil ou le projectif vers le capteur numérique), les valeurs deviennent comparables à celles des instruments optiques classiques et tournent à l'avantage de ceux-ci lorsqu'ils sont couplés à des boîtiers photographiques à chambre reflex du fait de capteurs 9 à 23 fois plus grands (de 22.2×14.8 mm à 35.9×24 mm), à la gamme dynamique plus étendue, et dont le champ d'image plus large, d'une résolution 5 à 12 fois supérieure, permet de zoomer à l'écran.

La confusion sur les rapports d'agrandissement n'existe pas seulement dans les brochures publicitaires mais aussi dans l'esprit des utilisateurs, car: 1) l'objectif, quoique fondamental, n'est qu'une partie du système optique; 2) le coefficient diffère selon qu'il s'agit d'observer ou de photographier. Ainsi, le rapport 1:1 (1 cm réel = 1 cm sur le capteur) obtenu directement avec un boîtier reflex pourvu d'un objectifs photomacrographique couvre un champ équivalent à celui d'une loupe binoculaire au rapport d'observation 8x avec des oculaires 10x/21. De même, avec le microscope, la différence de puissance entre les oculaires et le projectif se traduit par un agrandissement moindre sur le capteur que vers l'œil: une observation à 200x (avec oculaires 10x) est enregistrée au rapport 50:1 avec un projectif de 2.5x.

Ces rappels étant posés, les microscopes numériques ne présentent donc pas des caractéristiques aussi exceptionnelles que leurs notices tendraient à le faire croire. Leur choix doit se fonder davantage sur leur ergonomie, grâce à la diversité de fonctions qu'ils regroupent et à leur intégration numérique, que sur la qualité des images produites. De structure fermée, conçus pour des examens de contrôle, ils s'adressent avant tout à des utilisateurs inexpérimentés. Leur coût particulièrement élevé ne les prédispose guère à un usage archéologique, d'autant que leurs capacités les plus avancées (3D, assemblages panoramiques, etc.) ne sont activées que dans leurs configurations les moins mobiles.

Des alternatives à la fois moins coûteuses, plus flexibles, ouvertes et évolutives existent, à partir d'équipements dont disposent déjà les archéologues dans leur pratique quotidienne: appareils photographiques reflex avec leurs objectifs, ordinateurs, microscopes des spécialistes. Les compléments à rechercher pour ajouter la troisième dimension à nos modes d'enregistrement et d'analyse sont essentiellement logiciels et des solutions simples existent pour les étendre *in situ* aux échelles microscopiques.

L'appareil magique universel couvrant tous les besoins n'existant pas encore, il convient d'abord d'identifier l'échelle pertinente pour les observations que l'on souhaite réaliser.

## 5. Photogrammétrie

### 5.1 Acquisition

La profondeur de champ diminuant de façon inversement proportionnelle au grossissement, la limite d'usage de la photogrammétrie se situe autour du rapport 1:1 (Fig. 1), c'est-à-dire ce que permet un boîtier réflex pourvu d'un objectif photomacrographique. À cette échelle, la profondeur de champ ne varie plus selon la focale de l'objectif, le choix de celle-ci se fait donc essentiellement en fonction de la distance de travail, une focale trop courte étant contraignante pour l'éclairage.

Celui-ci doit être uniforme, avec le minimum d'ombre; il ne doit pas varier selon l'angle de vue. Le meilleur compromis pour les petits objets ou les détails de surface est l'usage d'un flash annulaire fixé à l'objectif (Fig. 1). L'idéal est de disposer plusieurs flashes de même puissance à équidistance du sujet, mais une telle installation s'avère peu pratique sur le terrain.

Le nombre de prises de vue dépend de la complexité de la forme. Pour des gravures ou des pétroglyphes, sur une surface peu tourmentée, deux dizaines de clichés rayonnant autour du détail central suffisent largement à fournir une combinaison de vues adéquate. Il importe de travailler en format brut (Nikon \*.nef, Canon \*.cr2, etc.), qui est au numérique ce qu'était le négatif à l'argentique (Verhoeven 2010), afin d'avoir une gamme dynamique plus étendue (encodage 12 à 16 bits) et de pouvoir corriger d'éventuelles variations d'exposition entre les vues. Il est préférable de laisser les réglages de netteté et de contraste sur une valeur moyenne et il est interdit de recadrer les clichés.

### 5.2 Traitement

Jusqu'à une période récente l'offre logicielle était réduite: soit des programmes professionnels coûteux soit des programmes gratuits au code source libre (Bundler, CMVS et PMVS2 pour l'extraction du nuage de point, couplés à Meshlab pour le maillage et le texturage: Snavely *et al.* 2008; Furukawa *et al.* 2010; Furukawa, Ponce 2010) mais ne tournant que sous système Linux. Des interfaces intégrées d'une meilleure ergonomie, SFMToolkit et Visual SFM, existent maintenant pour OS 64 bits Mac et Windows, mais leur installation requière néanmoins une certaine culture informatique. Une solution alternative peu coûteuse mais très performante est proposée par l'éditeur russe Agisoft, le logiciel Photoscan dont la version standard (sans gestion des coordonnées spatiales) convient parfaitement au traitement

Fig. 1 – Modélisation photogrammétrique avec Photoscan de l'extrémité émaillée d'un pic en quartzite, Olga Grande, Vallée do Côa, Portugal. Musée du Parc archéologique de Foz Côa. Echelle millimétrique.

Fig. 2 – Modélisation photogrammétrique d'une gravure de bovidé, grotte des Deux ouvertures, France. Vue du nuage de 12 058 786 points. Echelle centimétrique.

d'objets et de structures archéologiques. Photoscan, pour système Windows 32 et 64 bits, Macintosh et Linux, est simple d'emploi, riche d'options et de fonctions (masquage photographique, fusion de modèles, export au format pdf, etc.), et capable de traiter des volumes de données plus importants que les solutions basées sur PMVS2, car il n'est pas strictement dépendant de la mémoire vive (8 GB de RAM est cependant un minimum pour travailler efficacement). En outre il assure directement le maillage et peut générer des nuages de points si denses que le texturage n'est pas nécessaire pour rendre visibles des micro-détails topographiques (Fig. 2).

Ces logiciels sont évalués très positivement en situation archéologique (e.g. Ducke 2011; Plets *et al.* 2012; Skarlatos *et al.* 2012; Verhoeven *et al.*

2012; De Reu *et al.* 2013). Par rapport aux scanners laser les écarts de mesure apparaissent négligeables (Doneus *et al.* 2011; Mangier 2011; Kjellman 2012), puisqu'avec d'excellentes photos une résolution supérieure au 1/1000 de la zone photographiée peut être atteinte (Mora *et al.* 2012).

À défaut de disposer d'un ordinateur suffisamment puissant (multi-core, système 64 bits, carte graphique NVIDIA ou ATI, 8 gigabits de ram minimum), il est possible de recourir à des services gratuits sur Internet. Cependant, la plupart délivrent des modèles de faible résolution qui ne peuvent être comparés à ceux produits par les logiciels mentionnés ci-dessus; ils ne sont pas destinés à un usage professionnel et n'autorisent aucun ajustement des paramètres. Le mode opératoire est très simple: la série de photos est téléchargée sur le site qui effectue le traitement et quelques temps après un lien permet de sauvegarder le modèle. Parmi les services disponibles en 2012, citons Arc3D, Autodesk 123D, Hypr3D et My3DScanner. Arc3D, administré par l'Université catholique de Louvain, fournit directement des nuages de points qui ne sont guère plus résolus que ceux des autres services en ligne, mais il délivre aussi des cartes de profondeur à partir desquelles Meshlab peut opérer une construction beaucoup plus dense. Arc3D est le moins tolérant à la présence de zones floues dans les images, ce qui constitue un handicap pour le traitement des vues photomacrographiques; ce service s'est cependant avéré efficace pour modéliser une fouille archéologique (Dellepiane *et al.* 2013).

Lorsque la finalité de la modélisation est d'obtenir des volumes, comme dans le remarquable travail de Arles *et al.* (2011) sur un réseau de galeries de mine néolithique, ou lorsque le maillage sert essentiellement de support à une texture photographique, comme en architecture, ces services en ligne peuvent être suffisants pour des usages scientifiques; en revanche, ils ne conviennent guère pour des applications tracéologiques faute de restituer les détails fins. Dans tous les cas, il importe d'être très attentif aux closes de cession de copyright appliquées aux documents qui leurs sont transférés pour traitement

## 6. Compilation d'images

Au-delà du rapport 1:1, la photogrammétrie cède la place à la compilation d'images. La chaîne opératoire est là aussi scindée en deux phases: l'acquisition de la série de vues puis son traitement. Mais des outils numériques spécifiques, interviennent dès la première, avec des variantes selon le grossissement et l'instrumentation optique.

### 6.1 Acquisition

Selon le système optique employé, la séquence de prise de vue s'opère en déplaçant progressivement le bloc optique par rapport au plan image ou

bien l'objet le long de l'axe optique. Chaque solutions a ses détracteurs, l'une faisant légèrement varier le point de vue, l'autre le grossissement, mais le choix n'est en réalité possible qu'avec les objectifs autofocus connectés au boîtier reflex et pilotés par son intermédiaire, c'est-à-dire à priori à des rapports de grossissement allant jusqu'à 5:1 au moyen de bagues d'extension (équivalant à une observation binoculaire à 40x). Le réglage de la mise au point peut dans ce cas se faire par l'objectif ou par un statif. Au microscope la mise au point joue seulement sur la distance entre l'objet et l'objectif, par translation de la platine ou de l'ensemble du bloc d'observation.

Dans le premier cas, l'objectif de l'appareil photographique est piloté par un logiciel qui prend en compte les informations transmises par celui-ci ( focale, ouverture, etc.), tandis que l'affichage en mode *live view* sur l'écran de l'ordinateur permet de fixer les points les plus bas et les plus hauts du relief entre lesquels le logiciel calcule le nombre de pas nécessaire en fonction de la profondeur de champ, puis déclenche la séquence de prise de vues. La finesse du pas est directement tributaire de la précision du moteur de mise au point intégré à l'objectif ou au boîtier, c'est pourquoi il est préférable d'utiliser du matériel de conception récente (les capteurs numériques sont beaucoup plus exigeants sur la précision de la mise au point que ne l'étaient les films, jamais parfaitement plans). Trois logiciels sont disponibles: ControlMyNikon sous Windows pour boîtiers Nikon, DSLR Remote Pro Breeze sous Windows pour boîtiers Canon, et Helicon Remote sous Windows et Mac Os (inclus dans la suite Helicon Focus Pro à 200 \$), Android 3.1 et iOS pour boîtiers Canon et Nikon. A défaut, il est possible de procéder cliché par cliché avec les logiciels Canon Eos Utility (gratuit) ou Nikon Capture Control (payant), à partir de leur fenêtre de contrôle vidéo et des boutons de mise au point graduelle. A noter, enfin, pour les utilisateurs les plus expérimentés, qu'une alternative gratuite au firmware de certains boîtiers Canon, destinée à étendre leurs capacités cinématographiques, Magic Lantern de code source libre, ajoute aussi une fonction de prises de vue pas à pas. Tous ces logiciels de contrôle à distance fonctionnent sur des ordinateurs de faible puissance, tandis qu'Helicon Remote peut opérer à partir d'un smartphone ou d'une tablette tactile à système Android ou iOS pourvu d'un port USB Host.

Avec des objectifs à mise au point manuelle ou montés au bout d'un soufflet, ces solutions logicielles sont inopérantes. Mais une alternative existe sous la forme d'un banc à déplacement pas à pas micrométrique: le Stackshot de Cognysis Inc. Ce banc, qui fonctionne sur batterie ou secteur, est piloté soit par ordinateur au moyen des logiciels Helicon Remote ou Zerene Stacker (version Pro), soit par un boîtier électronique autonome. Cette même base (moteur et électronique) peut aussi servir à contrôler la mise au point d'un microscope par l'intermédiaire d'un entraînement à courroie (Fig. 4A).

Néanmoins, un microscope de laboratoire est difficilement transportable sur le terrain et totalement inadapté à l'examen de parois ou de vestiges au sol. Quant aux loupes binoculaires, quoique plus légères et disposant de statifs plus facilement modulables, elles ne constituent pas une base optique bien satisfaisante pour la photographie à haute résolution (Houssin 2008). Certes, elles ne démeritent pas avec une caméra vidéo à capteur 1/1.8, du type de ceux qui équipent les microscopes numériques, pour autant il est difficile d'en faire le cœur d'un système intégré.

La solution optique pour travailler à fort grossissement en haute résolution sur le terrain vient des passionnés d'entomologie, qui en exposent les détails techniques sur leurs forums, tests comparatifs et portraits d'insectes spectaculaires à l'appui. Elle consiste à monter un objectif de microscope sur un boîtier photographique, soit directement à l'extrémité d'un soufflet ou d'un jeu de bagues d'extension (Krebs 2009), soit dans le prolongement d'un téléobjectif d'une focale de 200mm (équivalent à la longueur de tube des microscopes les plus courants, c'est-à-dire la distance théorique entre l'objectif et l'oculaire).

La seconde variante (Fig. 3) est la plus intéressante pour un usage sur le terrain, car elle est à la fois la plus compacte, la moins vulnérable à la poussière et la plus simple pour les prises de vue destinées à la compilation. Sa course de mise au point n'a pas l'amplitude du balayage d'un Stackshot, mais elle est suffisante à l'échelle des reliefs microscopiques sur les surfaces archéologiques. L'objectif de microscope, dont la formule optique doit être ici de type "corrigé à l'infini" et sans correction résiduelle par les oculaires, est fixé au moyen d'une bague de conversion vissée sur le porte filtre du téléobjectif. Celui-ci agit comme la lentille de Telan (ou lentille de tube) du microscope en reformant sur un plan l'image projetée à l'infini par l'objectif métallographique. Un téléobjectif à mise au point interne est préférable, car peu ou pas sujet à des variations de centrage des lentilles mobiles. Des objectifs métallographiques à grande distance de travail (LWD) sont plus confortables à utiliser, de même qu'un zoom de plus grande amplitude focale (par ex. un 70-300 mm, utilisable à partir de 100 mm avec une ouverture de  $f/4$ ) qui permet de modifier le cadrage. Le rapport de grossissement sur le capteur est moindre qu'avec un microscope métallographique car l'image est ici projetée directement sans le relai d'un projectif; à la focale du télé-zoom équivalente à la longueur de tube du microscope (180 mm pour les objectif de microscope Olympus, indiquée sur leur carrossage), il correspond à la puissance de l'objectif, soit 10:1 pour un objectif métallographique de 10x. Un changement de focale du télé-zoom en deçà ou au-delà de cette valeur diminue ou augmente d'autant ce rapport: 16.6:1 avec un Olympus FL 10x à 300 mm et 15:1 avec un Nikon CFI10x. Il s'agit là cependant de valeurs théoriques, car les caractéristiques indiquées par les constructeurs sont souvent approximatives; il convient donc de procéder soi même à l'étalonnage de l'équipement utilisé au moyen d'un micromètre.

Fig. 3 – Observation microscopique *in situ* et modélisation 3D par compilation avec Helicon Focus. Echelle décimillimétrique: a. Grotte aux points, vallée de l'Ardèche, France. Détail de pigments; b. Shalobolino, province de Krasnoïarsk, Russie. Détail d'un pétroglyphe.

Fig. 4 – Acquisition et modélisation 3D au microscope optique: A. Moteur pas à pas pour prise de vue séquencée; B. Modélisation de l'usure microscopique d'une pointe moustérienne, Angé, France, calibrée dans le module pour Meshlab *depth map importer* programmé par E. Delord (Archéovision), à partir d'une carte de profondeur produite avec Helicon Focus. Echelle micrométrique.

Les qualités de l'image sont déterminées par l'objectif de microscope; elles peuvent être dégradées (moindre piqué, aberration chromatique) par un télé-zoom médiocre, mais celui-ci ne peut en modifier la structure. Lorsque le couplage est bon, on distingue aisément la différence entre les objectifs métallographiques achromatiques et semi-apochromatiques.

## 6.2 Traitement

À l'issue de la phase de saisie, nous disposons, comme pour la photogrammétrie, d'une série d'images à partir desquelles un logiciel spécifique va extraire les informations spatiales. Le choix parmi les logiciels de compilation d'images va croissant, du plus basique au plus performant, depuis des versions gratuites (CombineZ, Picolay, Tufuse, modules Stack Focuser et Extended depth of field et Stack Focuser pour ImageJ) jusqu'à des suites onéreuses regroupant différents outils commercialisées par les plus grandes marques de microscopes et compatibles avec leurs seuls instruments (Leica LAS Multifocus, Nikon NIS-Elements, Olympus Stream, Zeiss AxioVision), ainsi que par des éditeurs indépendants (par ex. MetaMorph, Image Pro Plus) mais compatibles avec différents matériels, en passant par des produits entre 150 et 300 \$ (Helicon Focus, Macnification, PhotoAcute Studio, Zerene Stacker) dont certains sont proposés aussi en licence académique. Il convient cependant de distinguer entre les logiciels qui assurent seulement une restitution 2D en hyperfocus, que l'on peut aussi obtenir sous Photoshop dès CS4, et ceux qui produisent un modèle tridimensionnel. Dans cette seconde catégorie, ceux adaptés à la restitution et l'analyse des reliefs sont plus rares que ceux dédiés à la tomographie (imagerie médicale, biologie, etc.) sur lesquels se concentre l'offre des gros éditeurs. Actuellement, les deux solutions les plus abordables pour la reconstitution des reliefs de surface sont ImageJ, de code source libre, avec ses innombrables modules, et Helicon Focus. Zerene Stacker aussi est à considérer, par sa capacité à produire des cartes de profondeur, mais il doit alors être couplé avec ImageJ, car il n'a pas de module de visualisation 3D ni de sauvegarde de modèle polygonal.

À la différence de la photogrammétrie où chaque point a ses 3 coordonnées absolues, l'échelle de l'axe vertical (Z) est relative dans les modèles construits par compilation d'images, car la distance entre chaque plan n'est pas déduisible des images elle-même. Il faut introduire cette valeur à l'issue du traitement si l'on souhaite que les 3 axes soient correctement proportionnés. Elle est généralement connue avec les statifs de microscope ( $2\mu$  entre chaque graduation de la molette fine sur les statifs Olympus de la gamme BH). Sinon, il est possible de procéder à un étalonnage à partir de jauges d'épaisseur ou d'échantillons connus (Berejenov 2009).

Cette calibration est aisément réalisée dans le logiciel Meshlab, de code source libre, développé par l'ISTI et le CNR italien, qui offre de nombreux

outils de traitement, de visualisation et d'analyse des modèles 3D. Les modèles polygonaux exportés depuis Helicon Focus ont une résolution limitée à 16384 points, par souci de compatibilité avec les ordinateurs peu puissants, tandis que les représentations 3D construites par Interactive 3D Surface Plot, module d'ImageJ, à partir des cartes de profondeurs importées d'autres logiciels, ne sont sauvegardées qu'en copie d'écran, comme celles produites en interne par Extended depth of field. C'est pourquoi un module pour Meshlab a été développé par le laboratoire Archéovision (UMS SHS 3D 3657), dans le cadre du projet *Tracéologie tridimensionnelle* financé par le Labex *Lascarb*, pour construire des modèles 3D polygonaux calibrés en haute résolution à partir des cartes de profondeur d'Helicon Focus ou de Zerene Stacker (Fig. 4B), et les sauvegarder dans les formats gérés par Meshlab. Il sera bientôt disponible gratuitement sous licence GNU.

Les logiciels de compilations d'images mentionnés, dont certains existent depuis une dizaine d'années, n'exigent pas de configuration matérielle particulière, en revanche Meshlab requiert un processeur graphique puissant et de la mémoire vive pour traiter des volumes denses et les afficher avec un minimum de fluidité.

## 7. Commentaire

Les outils pour introduire la 3D dans les pratiques de l'archéologie deviennent abordables. Auparavant lourde, peu autonome et onéreuse, l'instrumentation nécessaire se confond maintenant avec l'équipement de base de chaque discipline que complètent quelques accessoires spécifiques et une offre logicielle croissante, de source libre ou de petits éditeurs très réactifs (forum et assistance par mail) s'adressant à des amateurs passionnés souvent plus avertis que les usagers institutionnels, et fondant leur stratégie économique sur une large diffusion. Leurs licences sont souvent valables pour plusieurs ordinateurs d'un même utilisateur et leur parade contre le piratage est l'évolution rapide et régulière de leurs produits. Dans un tel contexte, on peut s'interroger sur la pertinence qu'il y a à acquérir des solutions fermées se chiffrant en dizaines de milliers d'euros et déjà obsolètes lorsque aboutit le processus de commande administrative.

Les solutions proposées ici ont été testées non seulement en laboratoire mais aussi en musée et dans diverses missions archéologiques en France, au Portugal et en Russie, dans des sites en grotte et plein air, sur des outils lithiques (Fig. 1), des empreintes, des pétroglyphes (Fig. 3B), des gravures fines (Fig. 2) et des peintures (Fig. 3A). À l'exception du statif, la totalité du matériel photographique et informatique tient dans un sac de cabine. Cet équipement est composé d'éléments d'entrée ou de milieu de gamme de marques réputées pour les boîtiers, les objectifs et l'ordinateur, et de provenance chinoise pour

les accessoires. La première campagne de relevé, en grotte, a été réalisée avec un ordinateur de type netbook vieux de 4 ans, suffisant pour piloter les prises de vues pas à pas par l'intermédiaire d'Helicon Remote et de ControlMyNikon (Fig. 3A). Après l'essai prolongé des différentes formules citées, les logiciels retenus pour le traitement des séries photographiques sont Helicon Focus pour la compilation d'images et Photoscan pour la photogrammétrie, du fait à la fois de leur souplesse d'usage, de l'étendue de leurs fonctions et de leur puissance de travail.

## 8. Conclusion

En tracéologie l'imagerie tridimensionnelle n'a pas encore atteint le stade d'applications courantes; jusqu'à récemment la technologie nécessaire était difficilement accessible et la difficulté accrue par l'étendue des échelles à couvrir, du décimètre au micron. L'augmentation constante de la puissance du matériel informatique, telle que décrite par G. More (1965), nous rend aujourd'hui accessible un nouveau registre de possibilités. La compilation d'images est déjà indispensable pour restituer la netteté des formes observées au microscope ou à la loupe binoculaire (Plisson, Lompré 2008; Гиря, Plisson 2009), la modélisation tridimensionnelle est en passe de le devenir pour caractériser objectivement les attributs d'usure et les marques d'outils (e.g. Mélard 2010; Bello *et al.* 2011), et particulièrement ceux dont la variabilité étaient négligée en l'absence de techniques d'enregistrement appropriées, tels que les émoussés des bords tranchants ou la concavité des surfaces de meules (Adams *et al.* 2009). Son apport apparaît aussi prometteur pour le partage des observations entre spécialistes, l'enrichissement des bases de données, les reconstitutions virtuelles, la diffusion vers le grand public. Tout ceci dorénavant est à la portée de nos appareils photographiques.

Hugues Plisson  
PACEA, UMR 5199  
Université Bordeaux, CNRS, Talence

Ce Projet a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir portant la référence ANR-10-LABX-52.

## BIBLIOGRAPHIE\*

Abramowitz M., Spring K.R., Flynn B.O., Long J.C., Parry-Hill M., Tchourioukanov K.I., Davidson M.W. 2012, *Basic Concepts in Optical Microscopy* (<http://www.olympusmicro.com/primer/anatomy/anatomy.html>).

\* Ressources électroniques au 31/12/2012.

- Adams J.L., Delgado S., Dubreuil L., Hamon C., Plisson H., Risch R., 2009, *Functional analysis of macro-lithic artefacts: a focus on working surfaces*, in F. Sternke, L. Eigeland, L.J. Costa (eds.), *Non-flint Raw Material Use in Prehistory: Old Prejudices and New Direction, Proceedings of the XV World Congress U.I.S.P.P. (Lisbon 2006)*, Oxford, Archaeopress.
- Arles A., Busdraghi F., Guyot J., Heckes J. 2011, *La photogrammétrie appliquée à l'archéologie minière: premiers essais*, Rapport inédit (<http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00656130/en>).
- Bello S.M., Vervenioutou E., Cornish L., Parfitt S.A. 2011, *3-dimensional microscope analysis of bone and tooth surface modifications: comparisons of fossil specimens and replicas*, «Scanning», 33, 316-324.
- Berejnov V.V. 2009, *Rapid and Inexpensive Reconstruction of 3D Structures for Micro-Objects Using Common Optical Microscopy*, arXiv.org, Cornell University Library, 8 (<http://arxiv.org/abs/0904.2024>).
- Delannoy J.J., Geneste J.M., Jaillet S., Boche E., Sadier B. 2012, *Les aménagements et structures anthropiques de la grotte Chauvet - Pont-d'Arc: apport d'une approche intégrative géomorpho-archéologique*, in J.J. Delannoy, S. Jaillet, B. Sadier (eds.), *Karst, Paysage et Préhistoire*, Le Bourget-du-Lac, Edytem, 43-62.
- Dellepiane M., Dell'Unto N., Callieri M., Lindgren S., Scopigno R. 2013, *Archeological excavation monitoring using dense stereo matching techniques*, «Journal of Cultural Heritage», 14, 201-210.
- De Reu J., Plets G., Verhoeven G., De Smedt P., Bats M., Cherretté B., De Maeyer W., Deconynck J., Herremans D., Laloo P., Van Meirvenne M., De Clercq W. 2013, *Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage*, «Journal of Archaeological Science», 40, 1108-1121.
- Doneus M., Verhoeven G., Fera M., Briese C., Kucera M., Neubauer W. 2011, *From deposit to point cloud. A study of low-cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archaeological excavations*, «Geoinformatics», 6, 81-88.
- Ducke B., Score D., Reeves J. 2011, *Multiview 3D reconstruction of the archaeological site at Weymouth from image series*, «Computers&Graphics», 35, 375-382.
- Fritz C., Tosello G., Azéma M., Moreau O., Perazio G., Péral J. 2010, *Restauration virtuelle de l'art pariétal paléolithique: le cas de la grotte de Marsoulas*, in G. Pinçon, J.M. Geneste (eds.), *Art rupestre: la 3D un outil de médiation du réel invisible?*, Paris, Ministère de la culture et de la communication.
- Furukawa Y., Curless B., Seitz S.M., Szeliski R. 2010, *Towards Internet-scale Multi-view Stereo*, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1434-1441.
- Furukawa Y., Ponce J. 2010, *Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis*, «IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence», 32, 1362-1376.
- Houssin P. 2008, *Photographier les microminéraux avec un stereomicroscope*, Cahier des Micromonteurs de l'AFM, 99, 17-20.
- KEYENCE 2010a, *Setting the trend in observation VHX-1000*, Catalogue disponible en ligne ([http://www.pliki.ferrox-electric.com/pdf/magazyn/KEYENCE\\_vhx\\_1000\\_ku.pdf](http://www.pliki.ferrox-electric.com/pdf/magazyn/KEYENCE_vhx_1000_ku.pdf) 21/12).
- KEYENCE 2010b, *Créer la tendance en observation VHX-1000*, Catalogue disponible en ligne ([https://www.microscopenumerique.fr/services/download\\_tnx.php?rm=reg&done=%2Fdownloads%2Findex.php&id=87eaf5a086cd45e81733d62ef75ce8a](https://www.microscopenumerique.fr/services/download_tnx.php?rm=reg&done=%2Fdownloads%2Findex.php&id=87eaf5a086cd45e81733d62ef75ce8a)).
- Kjellman E. 2012, *From 2D to 3D: a photogrammetric revolution in archaeology?*, Master Universitetet i Tromsø.
- Krebs C. 2009, *Microscope Objectives on Camera Bellows* ([http://www.krebsmicro.com/obj\\_bellows/index.html](http://www.krebsmicro.com/obj_bellows/index.html)).
- Mangier C. 2011, *Art préhistorique et numérisation 3D, approche méthodologique et comparative des techniques de numérisation 3D, L'exemple du bloc gravé de la grotte de la Mairie (Teyjat, Dordogne)*, Master, Université Bordeaux 1.
- Mélard N. 2010, *L'étude microtopographique et la visualisation 3D dans l'analyse de gravures préhistoriques – L'exemple des pierres gravées de La Marche*, in G. Pinçon, J.M. Geneste (eds.), *Art rupestre: la 3D un outil de médiation du réel invisible?*, Paris, Ministère de la culture et de la communication.
- Moore G.E. 1965, *Cramming more components onto integrated circuits*, «Electronics», 38, 114-117.
- Mora P., Dutailly B., Vergnieux R. 2012, *Un point sur la photogrammétrie*, «Archéopages», 34, 86-89.

- Pierrot Deseilligny M., Clery I. 2011, *Évolutions récentes en photogrammétrie et modélisation 3D par photo des milieux naturels*, in S. Jaillet, E. Ployon, T. Villemin (eds.), *Images et Modèles 3D en Milieux naturels*, Le Bourget-du-Lac, Edytem, 51-66.
- Pinçon G., Bourdier C., Fuentes O. 2008, *Les sculptures pariétales magdaléniennes du Roc aux-Sorciers (Vienne) et de la Chaire-à-Calvin (Charente) oeuvres d'un groupe culturel ou d'un seul et même artiste?*, in R. Vergniew, C. Delevoie (eds.), *Virtual Retrospect 2007 - Pessac (France) 2007*, Bordeaux, Editions Ausonius, 13-20.
- Plets G., Gheyle W., Verhoeven G., De Reu J., Bourgeois J., Verhegge J., Stichelbaut B. 2012, *Three-dimensional recording of archaeological remains in the Altai Mountains*, «Antiquity», 86, 884-897
- Plisson H. 1989, *Quelques considérations sur l'équipement optique adapté à la micro-tracéologie*, «Helinium», 29, 3-12.
- Plisson H., Lompré A. 2008, *Technician or researcher? A visual answer*, in L. Longo, N. Skakun (eds.), *"Prehistoric Technology" 40 years later: Functional studies and the Russian legacy*, BAR, Oxford, Archaeopress, 503-508.
- Robert E., Vigears D., Melard N., Paillet P., Vialou D., Egels Y. 2012, *L'apport de la 3D dans l'art préhistorique: analyse et restitution des images et de leurs supports, exemples croisés des sites de Blanchard (La Garenne) et la Marche*, in F. Giligny, L. Costa, F. Djindjian, P. Ciezar, B. Desachy (eds.), *Actes des 2<sup>e</sup> Journées d'Informatique et Archéologie (Paris 2010) – JIAP 2010*, «Archeologia e Calcolatori», Suppl. 3, 339-354.
- Semenov S.A. 1964, *Prehistoric technology; an experimental study of the oldest tools and artefacts from traces of manufacture and wear*, London, Cory, Adams&Mackay.
- Skarlatos D., Demestiha S., Kiparissi S. 2012, *An 'Open' Method for 3D Modelling and Mapping in Underwater Archaeological Sites*, «International Journal of Heritage in the Digital Era», 1, 2-23.
- Snavely N., Seitz S., Szeliski R. 2008, *Modeling the World from Internet Photo Collections*, «International Journal of Computer Vision», 80, 189-210.
- Spring K.R., Komatsu H., Scott M.L., Schwartz S.A., Fellers T.J., Carr K.E., Parry-Hill M., Davidson M.W. 2012, *Basic Concepts and Formulas in Microscopy* (<http://www.microscopyu.com/articles/formulas/>).
- Vergauwen M., Van Gool L. 2006, *Web-based 3D Reconstruction Service*, «Machine Vision and Applications», 17, 411-426.
- Verhoeven G.J.J., 2010, *It's all about the format: unleashing the power of RAW aerial photography*, «International Journal of Remote Sensing» 31, 2009-2042.
- Гиря Е.Ю., Plisson H. 2009, *О преимуществах применения программы Helicon Focus в археологической трасологии*, Helicon Focus ([http://www.photo-soft.ru/focus\\_trasologiya.html](http://www.photo-soft.ru/focus_trasologiya.html)).

## ABSTRACT

3D recording and viewing are about to become a common function in consumer electronic equipment, while 3D modeling is still seldom used in archaeological research, even in sectors where it could bring a concrete improvement such as in use wear studies. A new type of expensive microscope has been proposed to laboratories for making 3D models from direct macroscopic and microscopic observation: the digital microscope. Claimed to cover a wide magnification range up to many thousands of times, it involves software and hardware solutions which are now available at low cost for updating our current equipment. Since digital technology is progressing very quickly, it is disputable to spend large amounts of money in closed instruments, which are quickly outdated, when cheap alternative modular solutions can fill the same need. These solutions are based on two complementary principles whose effectiveness depends on the magnification scale: photogrammetry and image stacking. Photogrammetry requires only photographic skill for the acquisition and appropriate software or on line services for modeling, while image stacking, beyond real size (1:1), involves additional accessories for recording and software in both steps. By combining photographic and microscope lenses it is possible to get a light and flexible combo for microscopic recording in the field, not only in 2D but also in 3D, when connected to a laptop or a smartphone. This paper reviews the affordable software and hardware solutions available at the end of

## L'UTILISATION DES RELEVÉS SCANNOGRAPHIQUES EN ARCHÉOLOGIE DU BÂTI MÉDIÉVAL: L'EXEMPLE DE L'ÉGLISE DE VEYRINES (ARDÈCHE)

### 1. Introduction

L'équipe des médiévistes de l'UMR 5138 "Archéométrie et Archéologie" spécialisée en archéologie du bâti s'est équipée, en 2010, sur l'initiative d'A. Schmitt et grâce à des crédits exceptionnels octroyés par le CNRS, d'un laser scanner. Jadis dans l'impossibilité, pour des raisons techniques et financières, d'utiliser ce type d'outils, les archéologues de ce laboratoire se sont formés au maniement sur le terrain du laser scanner et au traitement des données. L'objectif de cette acquisition n'était pas uniquement de réaliser des relevés scannographiques des monuments étudiés mais de croiser les techniques de relevés traditionnelles avec la lasergrammétrie pour enrichir la documentation graphique qui reste à la base de l'analyse en archéologie du bâti. Le choix de l'équipement s'est porté sur le laser scanner Faro Photon 120 piloté par un ordinateur portable Dell ainsi que des logiciels de traitement des nuages de points Faro Scene, 3D Reconstructor et Faro Cloud. Le premier est conçu pour l'acquisition des données avec le scanner, leur visualisation et le traitement des points de numérisation 3D. Le second permet aussi d'acquérir les données, de les traiter (mise en place de filtres, de maillages, de mappage de photographies, extraction de coupes, de plans, d'orthophotographies); c'est également un outil de mesure et d'extraction de vidéos. Il pilote l'appareil photographique Nikon D300S qui prend des clichés ensuite associés au nuage de points. Le troisième logiciel est un applicatif vers AutoCAD. Ces outils sont aujourd'hui réunis au sein d'une plate-forme appelée "Archéologie et 3D" (Baud *et al.* 2012)<sup>1</sup>.

Le laser scanner est employé en priorité dans le cadre de programmes de recherche de l'équipe des médiévistes et en particulier dans les études de bâti: l'église de Veyrines en Ardèche sous la direction d'A. Baud et d'A. Schmitt, l'abbaye de St-André-le-Haut à Vienne en Isère dirigées par A. Baud et M. Zannettacci ou encore à l'abbaye de l'île Barbe à Lyon dans le cadre d'un travail de thèse mené par Ch. Gaillard. Mais cet équipement lourd et performant n'a pas vocation à servir à une seule équipe: il est aussi utilisé en collaboration avec d'autres UMR de la Maison de l'Orient et de la Méditerranée, notamment avec l'Institut de Recherche en Architecture Antique dans le cadre de l'étude du théâtre antique d'Orange ou encore en partenariat avec le Service Archéologique de la ville de Lyon pour l'étude de la citerne antique dite "Grotte Bérelle".

<sup>1</sup> Cette plate-forme est placée sous notre responsabilité au sein de l'UMR 5138.

Notre article, qui présentera la méthodologie employée et les résultats obtenus dans le cadre de l'étude de l'église romane de Veyrines en Ardèche, vise à montrer le potentiel et les limites de la technique d'acquisition 3D et de confronter les besoins et les solutions techniques apportées dans le cadre de l'archéologie du bâti<sup>2</sup> (Baud *et al.* 2012).

L'analyse archéologique de cet édifice a concerné les parties intérieures en utilisant deux méthodes complémentaires de relevés: manuels (pierre à pierre) et scannographiques (par acquisition d'un nuage de points). En raison des crédits alloués à l'opération et de la durée de l'étude sur le terrain (15 jours), les relevés manuels ont été réalisés à l'aide de deux échafaudages mobiles. Seul le mur de l'abside a fait l'objet d'un relevé manuel en développé complet. Les autres ne pouvaient être que partiels sur les murs Sud, Ouest et Nord de la nef et sur le mur Ouest du bras Sud du transept. Il est donc apparu nécessaire de les compléter par un relevé scannographique.

Cette opération archéologique était aussi l'occasion de former les étudiants en Licence 3 de l'Université Lyon 2 aux techniques de relevés pierre à pierre et de les initier aux techniques de relevés scannographiques. En archéologie du bâti, en effet, le relevé est un outil indispensable. Il reste à la base de l'observation, car il restitue ou transcrit le "document" qu'est l'élévation d'un édifice (Baud, Parron 1999, 176-178). Il traduit le plus fidèlement l'observation concrète du bâtiment. Pour le réaliser, on utilise un carroyage composé d'un réseau d'axes orthonormés installé contre le mur et l'on dessine à l'échelle 1/20<sup>e</sup> sur calque polyester millimétré. Les dessins obtenus ne sont pas de simples illustrations mais de véritables outils de travail qui traduisent différentes problématiques. C'est à partir du relevé, du faisceau d'observation qui apparaît sur ces "minutes", que peut être menée une analyse globale du bâtiment: sa chronologie relative, les techniques de construction, etc. Tous ces éléments participent à une meilleure connaissance du déroulement du chantier de construction. L'exactitude dimensionnelle que procure le relevé manuel permet d'affiner nos connaissances sur les matériaux mis en œuvre et d'enregistrer précisément tout type de césure. A Veyrines, outre ces analyses classiques, les relevés ont permis l'examen stratigraphique des enduits et une étude géologique de l'église en relation avec les ressources en pierres du territoire a été menée par A. Schmitt (Baud *et al.* 2012, 2-4). L'intervention avait pour objectif d'étudier l'architecture et les modes de construction de cette fondation rurale représentative du bâti médiéval et religieux du haut Vivarais.

Avant d'exposer la méthodologie employée, une rapide présentation de l'église de Veyrines s'impose.

<sup>2</sup> Cette étude a également fait l'objet d'un rapport de fouille.

## 2. Présentation du prieuré de Veyrines (Fig. 1)

Le prieuré de Veyrines se situe en Ardèche, dans le haut-Vivarais, un territoire marqué par l'implantation de plusieurs établissements religieux aux XI<sup>e</sup> et XII<sup>e</sup> siècles. Cette période du Moyen Âge voit, en effet, le développement intensif du monachisme à travers la floraison de plusieurs prieurés d'obédiences diverses. L'abbaye de Saint-Chaffre fonde ainsi trois prieurés dont celui de Veyrines. Le prieuré de Veyrines se situe sur la commune de Saint-Symphorien de Mahun et constitue l'un des exemples le mieux conservé parmi ces fondations religieuses médiévales du haut-Vivarais. Cette église prieurale de moyenne montagne, située au centre du hameau, est encore relativement peu restaurée, excepté les voûtes du transept. Elle est orientée Nord-Est et présente un plan à une nef unique dotée à l'Est d'un transept débordant et d'une abside encadrée de deux absidioles greffées directement sur les croisillons. Un clocher quadrangulaire domine la croisée du transept.

L'église possédait trois accès assurant la communication avec l'extérieur: un portail monumental aménagé dans la façade occidentale et deux portes plus modestes ouvertes dans chacun des murs Ouest du transept: la première, au Nord, donnait sur l'ancien cimetière; la seconde, aujourd'hui condamnée, livrait un accès au prieuré. À côté de cette dernière porte, une autre baie ouvre sur une étroite montée d'escalier, ménagée dans l'épaisseur du mur et desservant le clocher. La nef est charpentée. Néanmoins, d'anciennes photographies indiquent un couvrement lambrissé remontant probablement à l'époque moderne (Poidebard 1928). Les murs sont ouverts par des fenêtres en plein cintre et à ébrasement unique: à l'Ouest une baie largement ébrasée est placée immédiatement au-dessus du portail alors que chacun des murs gouttereaux, est percé de deux baies. L'abside principale présente à l'intérieur un tracé semi-circulaire tandis que l'enveloppe extérieure est composée de trois pans. Trois fenêtres cintrées et ébrasées assurent l'éclairage du sanctuaire. La croisée du transept est déterminée par quatre grandes arcades brisées à la clé, reposant sur des piliers engagés dotés de chapiteaux à thèmes végétaux ou narratifs du XII<sup>e</sup> siècle. Elles supportent une coupole octogonale sur trompes. Les bras du transept sont voûtés en berceau; une baie ouverte dans chacun des murs Sud et Nord, permet l'éclairage du lieu. Le voûtement a été largement repris au béton au moment des restaurations; contrairement à la coupole, il ne subsiste qu'une petite section de maçonneries originelle. Les absidioles ont été presque entièrement remontées de telle sorte que nous ignorons si les murs étaient à l'origine aveugles, comme c'est le cas aujourd'hui, ou s'ils étaient percés d'une fenêtre. Néanmoins, il est plus vraisemblable qu'ils aient été ouverts par une petite baie.

Fig. 1 - Veyrines (Ardèche), église Sainte-Marie, nuage de points des différents scans assemblés et plan au sol (réalisation A. Flammin).

### 3. Méthodologie de la réalisation des relevés scannographiques

#### 3.1 *Acquisition des données*

Quatre scans ont été réalisés à l'intérieur de l'édifice avec une résolution de 1/5 (c'est-à-dire 1 point tous les 7.5 mm à 10 m). Sur le terrain, l'acquisition

des scans s'effectue à l'aide des sphères placées en différents endroits de façon à ce que, de chaque station, on puisse voir au moins trois sphères de la station précédente. L'utilisation de cette méthode garantit le recalage automatique des scans entre eux lors de leur traitement dans le logiciel Faro Scene.

### *3.2 Traitement réalisé sur le nuage de points*

Les nuages de points sont d'abord filtrés de manière à enlever les points aberrants (à l'aide des filtres de Faro Scene et de 3D Reconstructor). Une sélection manuelle des zones d'intérêt est réalisée et les points situés en dehors de ces zones sont enlevés de manière à alléger le scan. Les nuages des points des quatre scans sont ensuite assemblés entre eux (étape appelée consolidation) grâce à la reconnaissance automatique des sphères dans Faro Scene. Une fois le recalage automatique des scans terminé, on obtient une vue du nuage de point intégral de la partie intérieure de l'édifice (Fig. 1).

### *3.3 Extraction des plans au sol*

Il est aisé d'extraire, avec les logiciels Faro Scene et 3D Reconstructor, le plan au sol de l'édifice à partir du nuage de points ou à différents niveaux (au niveau des baies par exemple, etc.). Nous avons ainsi réalisé un plan au sol de l'édifice (Fig. 1). Le logiciel offre aussi la possibilité de créer des coupes longitudinales de l'église.

### *3.4 Extraction des orthophotographies*

La génération d'orthophotographies à partir des modèles 3D est également possible à partir de Reconstructor. Cinq orthophotographies (ou des "ortho-nuages de points") des élévations intérieures de l'édifice ont ainsi été extraites. Il s'agit d'images redressées des élévations sous la forme de nuages de points, plus ou moins nettes en fonction de la densité des points. Ces orthophotographies sont exportées de Reconstructor vers AutoCAD puis retravaillées en dernier lieu dans le logiciel Adobe Illustrator où certains éléments architecturaux sont dessinés. Nous avons ainsi réalisé les orthophotographies des murs Ouest du transept, des murs gouttereaux Nord et Sud et du revers de la façade occidentale (Figs. 2-4).

## **4. Complémentarité des méthodes de relevés manuel et scannographique**

Les relevés manuels des murs ont donc pu être intégrés et repositionnés dans les orthophotographies mises à l'échelle (dans le logiciel Adobe Illustrator). Certaines parties des relevés ont été complétées. Le relevé du mur Ouest du bras Sud du transept par exemple a été inscrit dans le relevé scannographique

de la coupe transversale des murs Ouest de ce même transept (Fig. 2). Les relevés pierre à pierre des murs gouttereaux Nord et Sud ont été complétés et les limites supérieures (charpente) et inférieures (sol) ajoutées (Fig. 3). Afin de distinguer les relevés manuels et scannographiques, une couleur différente (le bleu) a été employée. Il nous a paru important en effet de dissocier sur le relevé ce qui avait été dessiné manuellement de ce qui avait été dessiné à partir de l'orthophotographie imprimée à l'échelle 1/20<sup>e</sup> et complétée en retournant dans l'église pour ajouter les informations manquantes indispensables à l'étude comme certains blocs, les césures, les reprises, etc. que l'on ne discerne pas directement sur ce document.

## 5. Les avantages et les limites de l'utilisation du laser scanner en complément du relevé manuel

L'un des premiers avantages de l'utilisation du laser scanner a été la possibilité de compléter des relevés trop partiels, de les repositionner dans le cadre architectural général entier et ainsi de produire une documentation graphique complète des élévations. Sans l'emploi du laser scanner, les parties hautes de l'édifice inaccessibles n'auraient pu être relevées. Or elles recèlent des informations importantes sur le phasage de cet édifice. Sans détailler ici tous les résultats de l'analyse de bâti (Baud *et al.* 2012), on peut néanmoins souligner que les parties hautes ont été reprises pour l'installation des deux nouvelles baies qui ne sont pas d'origine et trahissent une restructuration importante de la nef. Elles pourraient en effet avoir remplacées de plus anciennes ouvertures. Sur le revers du mur de façade à l'Ouest on note la reprise des parties hautes avec l'insertion de cette large fenêtre au-dessus du portail. Par ailleurs, au sommet des murs Sud et Nord, le relevé montre la présence de jambes de forces appartenant à une ancienne charpente: il s'agit d'une charpente à "ferme-diaphragme" dont les vestiges sont encore visibles et d'autres ne sont connus que par les désordres créés dans la maçonnerie suite à des arrachages. En chronologie relative, l'insertion de cette charpente a clairement eu lieu après la reprise des baies. Les murs sont ensuite rehaussés d'une quarantaine de centimètres comme en témoigne la césure horizontale: cette phase correspond à la destruction de la charpente précédente lorsqu'une nouvelle toiture est installée sur la nef. A partir de cette documentation graphique, la restitution très précise des différents états de l'édifice en plan et en élévation est réalisable.

Le second avantage réside dans la réalisation simple et très rapide, à partir du nuage de points, de coupes et de plans au sol (Fig. 1). Un autre apport de la technique laser scanner pour l'archéologie du bâti est de pouvoir travailler – à partir des cotes et des dimensions prises directement sur le nuage de points dans le logiciel Reconstructor – sur les questions de modules des

Fig. 2 - Veyrines (Ardèche), église Sainte-Marie, transept, murs Ouest, présentation des techniques de relevés (relevés et DAO: étudiants de l'Université de Lyon2, O. Puél et A. Flammin; relevés scanographiques: A. Flammin).

Fig. 3 – Veyrines (Ardèche), église Sainte-Marie, nef, murs gouttereaux Sud, présentation des techniques de relevés (relevés et DAO: étudiants de l'Université de Lyon2, O. Puel et A. Flammin; relevés scannographiques: A. Flammin).

Fig. 4 – Veyrines (Ardèche), église Sainte-Marie, mur Ouest, présentation des techniques de relevés (relevés et DAO: étudiants de l'Université de Lyon2, O. Puel et A. Flammin; relevés scannographiques: A. Flammin).

blocs, des divergences de hauteur d'assises, du positionnement des trous de boulin et donc de l'échafaudage à l'échelle du monument entier.

En revanche l'une des limites de son utilisation apparaît clairement lorsqu'il s'agit de marquer les différents enduits superposés indispensables à l'étude de bâti car ils sont imperceptibles sur la seule orthophotographie. Il est nécessaire de retourner sur le terrain pour compléter ces informations manquantes et l'orthophotographie imprimée à une échelle souhaitée nous a servi de base pour parachever ce travail. On l'aura compris, l'emploi du laser scanner ne saurait remplacer le nécessaire contact direct avec le mur pour son analyse dans le cadre d'une étude de bâti. L'approche essentielle du «nez collé au mur», comme le rappellent A. Baud et I. Parron, permet en effet une observation indispensable de l'ensemble des données architecturales car certains détails sont uniquement accessibles à l'œil nu: telle que la présence de plusieurs enduits superposés, de traces laissées par un outil sur la pierre ou bien de liaisons entre les pierres (Baud, Parron 1999, 176).

## 6. Conclusion

En conclusion, le bilan de l'utilisation du laser scanner dans le cadre de l'étude de bâti de l'église de Veyrines est plutôt positif. Il a permis de compléter les relevés de terrain à partir des orthophotographies des élévations intérieures et d'obtenir une documentation graphique plus complète. Ces relevés scannographiques sont d'une grande précision et leurs superpositions avec les relevés pierre à pierre réalisés par les étudiants a été très facile. Ils

ont, de plus, été réalisés dans des délais extrêmement rapides puisque sur le terrain, une demi-journée a suffi pour la réalisation des scans, une autre pour leur assemblage et pour la réalisation des orthophotographies. Mais les relevés scannographiques n'ont pas vocation à se substituer intégralement au relevé pierre à pierre exécuté à la main – qui reste indispensable pour étudier la taille des pierres, leur nature et les composantes du mortier et permet une analyse très pointue des élévations – mais peut être utilisé pour le compléter quand des parties restent inaccessibles ou quand l'installation d'un échafaudage reste trop coûteux. L'innovation et le haut degré de technicité du laser scanner ne doivent pas faire oublier que le relevé obtenu est souvent insuffisant et nécessite des compléments indispensables liés à l'analyse réalisée par l'archéologue. Rien ne remplace le contact direct avec le monument et sa réalité physique. Il est en tout cas nécessaire de retravailler un relevé scannographique.

Désormais, suite à l'expérience menée à Veyrines, le laser scanner est systématiquement associé à nos opérations d'archéologie du bâti. Les orthophotographies des élévations de l'hôtellerie Saint-Hugues à l'abbaye de Cluny serviront, par exemple, de "supports" aux relevés manuels pour un gain de temps et de précision évidents lors de la phase de terrain<sup>3</sup>. Le laser scanner s'avère être également un instrument d'analyse précieux dans le cadre d'un travail en cours, débuté en 2011, sur le positionnement et la restitution du décor sculpté aujourd'hui déposé du mur du fond de scène du théâtre antique d'Orange, en collaboration avec l'Institut de Recherche sur l'Architecture Antique et sous la direction de J.-Ch. Moretti.

Anne Flammin

UMR 5138

«Archéométrie et Archéologie»

Maison de l'Orient et de la Méditerranée, Lyon

#### BIBLIOGRAPHIE

- Baud A., Parron I. 1999, *L'analyse architecturale et le relevé pierre à pierre*, in A. Baud, I. Parron (eds.), *Les techniques de relevé d'élévation, Table ronde (Bibliothèque municipale de Lyon 1997)*, Centre international d'études romanes, 176-183.
- Baud A., Schmitt A., Flammin A., Puel O. (eds.) 2012, *Veyrines (Ardèche), église Sainte-Marie. Etude archéologique du bâti*, Rapport de fin d'opération, DRAC Rhône-Alpes, Service régional de l'archéologie (dactylographié).
- Poidebard R. 1928, *L'église de Veyrines: XII<sup>e</sup> siècle*, Aubenas, C. Habauzit.

<sup>3</sup> Dans le cadre d'une étude de bâti menée en 2012-2013 en collaboration avec une équipe de Centre d'Etude Médiéval d'Auxerre.

## ABSTRACT

In building archaeology, the survey is the most important tool. It gives a global analysis of the building: its relative chronology, the building stratigraphy, the architectural techniques, etc. These elements indicate the progress of the construction site. A section of the "Archéométrie et Archéologie" laboratory (UMR 5138), managed by Prof. N. Reveyron, is specialized in building archaeology. Archaeologists, confronted with the analysis of a building, often choose the manual survey, "stone by stone". In 2010, the laboratory equipped itself with a LaserScan (Faro Photon 120) and software of processing point-cloud (Faro Scene and JRC Reconstructor) for surveys of medieval archaeology. Formerly unable to use this type of tool, the archaeologists of this laboratory received in situ training in the manipulation of the laser scanner and in the data processing. The goal of this acquisition was not to produce simple point-cloud surveys, but to cross the traditional technique (hand-sketch survey) with the lasergrammetry, in order to enrich the graphic documentation, which is the basis of any building archaeology analysis. It should document a building, improve the hand survey and facilitate the realization of new surveys, without the need for an often too-expensive scaffold. This article presents our methodology and the results obtained during building analysis of the Romanesque Church of Veyrines in Ardèche; it aims to demonstrate the potentials and the limitations of this technique of 3D acquisition, and to compare the needs and the technical solutions afforded by building archaeology.

## LA 3D AU SERVICE DE L'OBSERVATION ARCHÉOLOGIQUE ET DE SON ILLUSTRATION SCIENTIFIQUE

### 1. Introduction

Le présent article s'intéresse à quelques usages de levés en 3D de vestiges archéologiques à des fins scientifiques rencontrés dans des publications ou lors de communications dans des colloques récents. L'usage du levé 3D étant encore souvent expérimental, il demeure difficile d'en tirer des certitudes. Aussi l'objectif de cette brève étude se limite à constater en quoi le levé 3D, et le modèle numérique qui en découle, peuvent aider à l'observation archéologique, et comment ils sont utilisés dans les publications scientifiques.

Dans la majorité des cas rencontrés, le modèle numérique sert de support à la restitution archéologique. Au mieux, car cela reste rare, plusieurs hypothèses de restitution sont testées, qu'elles soient architecturales, constructives ou fonctionnelles. La restitution n'est pas ici un but en soi, mais elle est le moyen d'arriver à poser des interrogations plus difficiles (voire impossibles) à imaginer sans elle. En cela elle est un outil de la recherche archéologique<sup>1</sup>.

Outre le test d'une restitution des volumes grâce à la maquette 3D, quelques usages de celle-ci permettent de simuler les mouvements et les forces qui les régissent, ou d'expérimenter les possibilités physiques des matériaux ainsi que la faisabilité technique de telle ou telle machine<sup>2</sup>.

La maquette virtuelle est également utilisée comme support de présentation de l'état de la connaissance relative à un lieu donné, à une période précise, et dans ce cas, elle est en général associée à une base de données détaillant les sources des connaissances rassemblées en elle et sur quelles informations se fondent d'éventuelles hypothèses de restitution<sup>3</sup>.

En dehors de ces utilisations du modèle numérique qui participent à une démarche scientifique de restitution, une utilisation plus immédiate se rencontre aussi: celle qui participe à l'observation, voire à la compréhension du vestige, d'une manière beaucoup plus intuitive que par le biais des plans et coupes traditionnels. Pour cela le levé 3D brut est utilisé, c'est-à-dire le nuage de points plus ou moins travaillé, maillé puis nappé par des clichés numériques.

Dans ce sens, le levé 3D offre une visualisation particulièrement efficace des vestiges excavés ou souterrains, et permet d'enregistrer puis de représenter des vestiges autrement très difficiles à juxtaposer, en restituant une vision

<sup>1</sup> [http://varjournal.es/doc/varj02\\_004\\_18.pdf](http://varjournal.es/doc/varj02_004_18.pdf).

<sup>2</sup> <http://www.ifporient.org/en/node/929>.

<sup>3</sup> [http://archeovision.cnrs.fr/pdf/vr09\\_pdf/09\\_Bernard.pdf](http://archeovision.cnrs.fr/pdf/vr09_pdf/09_Bernard.pdf).

d'ensemble continue impossible à obtenir pendant la fouille, en particulier en milieu instable ou humide<sup>4</sup>.

À une toute autre échelle, la modélisation en 3D de mobilier tel que la céramique ou le lithique est expérimentée afin de contribuer à l'élaboration de typologies, et les premières collections virtuelles investissent le net, en particulier les collections d'ossements humains, en attendant des collections virtuelles de référence plus spécifiques à l'archéologie.

À travers la documentation existante sur les expérimentations de la 3D en archéologie, deux discours différents sur le levé 3D se dégagent, celui des archéologues et celui des ingénieurs spécialistes de ces techniques numériques:

- L'archéologue bâtit un projet scientifique et définit des objectifs justifiant le recours (ou non) à un levé en 3D;
- L'ingénieur met en avant le fait que le relevé 3D propose un enregistrement objectif des aspects visuels (couleur et géométrie), pour que des chercheurs de tous bords puissent réaliser par la suite les études qu'ils souhaitent.

Des questions élémentaires comme "Qu'est ce que l'on attend d'un levé 3D?" ou "Comment utiliser ce modèle numérique?" devraient pourtant rapprocher archéologues et ingénieurs et renforcer leur collaboration. Afin d'esquisser ici quelques pistes dans ce sens, le modèle 3D va être, dans un premier temps, considéré comme un support de l'observation qui décrit et questionne, et dans un second temps comme un pourvoyeur d'images scientifiques.

## 2. Le modèle 3D au service de l'observation archéologique

Le modèle virtuel peut permettre de voir des structures ou des éléments auxquels on n'avait pas accès avant de bénéficier de cet outil (certains microreliefs grâce au LIDAR) ou dont l'accès est particulièrement difficile (les parties hautes d'un édifice, et ce qui est difficile à traduire et lire en plan et coupe: grottes et souterrains aux formes souvent irrégulières).

Le modèle numérique d'un objet archéologique, qu'il soit lourd ou fragile, morphologiquement complexe, distant ou détruit, permet également de le manipuler virtuellement, en tous sens, n'importe quand, n'importe où et sans limite, en dehors de celles imposées par la résolution. De la manipulation de ce support visuel découle l'observation puis l'analyse descriptive: quelle forme, quelle dimension, quels matériaux, quelles techniques de fabrication ou de construction, etc., c'est-à-dire la collecte d'informations qui font partie de la démarche archéologique. La maquette numérique est ainsi un support de l'observation.

<sup>4</sup> [http://archeovision.cnrs.fr/pdf/vr09\\_pdf/09\\_Raymond.pdf](http://archeovision.cnrs.fr/pdf/vr09_pdf/09_Raymond.pdf).

Mais peut-on cerner en quoi ce modèle numérique apporte quelque chose de novateur au raisonnement archéologique? Qu'est-ce qu'il change dans le rapport à l'objet, et qu'est ce que cela change dans l'analyse archéologique que l'on en fait? Doit-on utiliser le modèle comme l'objet réel, doit-on vouloir en tirer les mêmes analyses, doit-on les exprimer ou les représenter de la même façon? Est-ce que la fonction heuristique de la maquette virtuelle diffère de celle de la maquette réelle (en bois ou en carton par exemple) ou de la vue axonométrique? On ne peut certainement pas encore répondre à toutes ces interrogations, alors tentons de partir de ce qui est le plus visible.

Le changement le plus évident produit par le levé 3D et le modèle qui en découle est la tentation de reporter certaines observations en post-fouille, alors que le terrain (ou l'objet) n'est plus accessible. Par conséquent, l'interprétation et l'analyse archéologique peuvent dépendre – dans des proportions qui restent à déterminer – du modèle virtuel et non plus uniquement de l'objet réel. Quelles précautions doivent être prises pour ne pas manquer une observation sur le terrain qui ne serait pas visible sur le modèle numérique?

Le modèle issu du levé 3D, que le nuage de points vienne d'un scan laser ou de la corrélation dense d'images, est fréquemment utilisé pour le mesurage et la description, et ces usages peuvent donner quelques indications sur les précautions.

En phase étude, l'utilisation du modèle numérique pour le mesurer est perçue comme une avancée importante par rapport à la prise de mesures sur le terrain, toujours un peu fastidieuse. Celle-ci est réalisée une seule fois, si on ne l'oublie pas bien sûr, et les mesures sont soumises à l'imprécision des outils et aux erreurs de lecture et d'écriture. Ces erreurs peuvent aussi être commises avec un modèle numérique, mais la prise de mesures peut être répétée autant de fois que nécessaire, et cela bien après la disparition des vestiges réels.

L'avancée est également notable dans la facilité offerte pour le calcul des volumes, les irréguliers en particulier, et qui peuvent être archéologiquement significatifs<sup>5</sup>. Une réserve cependant peut être faite à l'utilisation du modèle numérique pour le mesurage: il conviendrait en effet de connaître la justesse et la précision des mesures qu'il autorise. Un travail de comparaison entre les différentes méthodes (laser-scanner/photogrammétrie) serait à réaliser, et au sein de chaque méthode, il faudrait également évaluer les algorithmes et le traitement de l'information des nombreux logiciels disponibles, qu'ils soient de redressement, d'assemblage, ou encore de calcul de nuages de points. Et avant tout cela, il est fondamental de se mettre d'accord sur la précision nécessaire (et suffisante) pour chaque usage identifié. Le recours à des technologies non

<sup>5</sup> Citons l'exemple de la carrière de Roquefraise à St Jean de Védas dans l'Hérault, dont le modèle numérique a servi (entre autres) pour le calcul des volumes excavés, et donc pour estimer le nombre de blocs extraits: <http://www.cepam.cnrs.fr/spip.php?article2053>.

encore, ou pas encore assez comparées aux techniques traditionnelles de relevé, entraîne un travail de fond qui paraît aujourd'hui bien peu compatible avec la pression économique et l'esprit du temps.

Outre l'utilisation du modèle 3D à des fins de mesurage, son utilisation à des fins d'observation est de plus en plus répandue. Le modèle comme support de l'observation et les précautions qui en découlent sont particulièrement bien illustrés par le relevé de bâti qui demande une observation très détaillée. Il est peu probable que l'on puisse remplacer par la vue du modèle virtuel l'observation nécessaire à la réalisation d'un relevé classique de terrain. Dessiner nous oblige à interpréter et vérifier à la pointe de la truelle ce que l'on observe. Il faudrait donc pouvoir effectuer sur le modèle numérique cette interprétation qui se matérialise actuellement par le dessin – ou plus exactement – par le choix de contours archéologiquement significatifs. Essayer de faire une description uniquement avec le modèle virtuel, c'est un peu comme faire une description à partir d'une photo ou même d'un dessin détaillé et légendé: sans le vestige réel sous les yeux, c'est insuffisant pour déterminer ses matériaux, son mode de construction, ses reprises, sa chronologie, son histoire. Il faudrait donc que l'on puisse non seulement observer ce niveau de détail sur le modèle numérique, mais aussi en identifier la nature.

De rares retours d'expériences rendent compte de ce qu'il permet d'observer pour pouvoir être compris et dessiné lorsque cela est nécessaire (cf. *supra* Flammin). Le nuage de points seul n'est pas toujours suffisant pour voir les limites des moellons ou des blocs, cela dépend de la couleur de la pierre et de celle des joints, et sans doute aussi de la densité des points. Dans ce cas, il convient de plaquer sur le nuage de points une photo du mur, qui permet alors de mieux discerner les limites des moellons. Cependant, même le modèle numérique photo-réaliste n'offre pas une visualisation assez nette pour permettre la détermination de certaines limites, comme celles des enduits, des traces de pigments ou d'outils, des marques de tâcherons, des différents joints entre les pierres. Seule l'observation directe du vestige peut fournir ce type d'informations.

On peut également tout à fait s'affranchir du dessin en pierre à pierre, loin d'ailleurs d'être toujours utile au propos archéologique, du moment que l'interprétation est issue de l'observation sur le terrain. Dans ce cas, une orthophotographie peut par exemple servir de fond à un dessin illustrant la stratification d'une maçonnerie<sup>6</sup>.

Au-delà des réserves d'usage quant à la justesse et la précision des outils et méthodes utilisés, un levé 3D rend indéniablement compte de la géométrie générale du vestige et de certains détails d'architecture. Néanmoins, il est à

<sup>6</sup> [http://varjournal.es/doc/varj02\\_003\\_completo.pdf](http://varjournal.es/doc/varj02_003_completo.pdf), 124, fig. 5.

notation de la superposition des enduits, nature des pierres, des mortiers, etc.). Un levé automatique sans intervention de l'archéologue pour relier le modèle numérique au vestige réel par ses observations n'est certainement pas souhaitable. En revanche, un levé automatique comme support de l'interprétation, c'est-à-dire complété par la notation des observations, peut être compatible avec les exigences de l'enregistrement archéologique. De la même façon, des orthophotographies issues du modèle 3D peuvent servir de fond "visuel" à la description, et des orthophotos "décalquées" dans un logiciel de DAO peuvent produire un dessin traditionnel et d'usage identique, si toutefois l'expérience accumulée ces dernières décennies en archéologie, notamment préventive, ne remet pas en cause l'utilité de certaines représentations du type "pierre à pierre". L'idéal serait de pouvoir exploiter le modèle numérique sur le terrain, comme on le fait déjà avec les clichés, en l'annotant et en l'enrichissant d'observations faites sur le vestige réel.

### 3. L'illustration scientifique en 2D à partir des modèles numériques 3D

Après cet aperçu de l'usage du modèle 3D comme support de l'observation, voyons son utilisation comme support de la représentation de l'observation, c'est-à-dire comment il vient illustrer visuellement le discours archéologique, qui lui est sous forme textuelle.

D'une façon générale, le modèle numérique permet de visualiser l'objet d'une manière plus naturelle, plus intuitive, que les représentations traditionnelles en plan et coupe. Devant l'écran de l'ordinateur, la représentation en 3D garde tout son sens. Mais les supports qui accueillent actuellement le discours archéologique et ses illustrations sont en 2D. Malgré l'existence du pdf 3D, publications ou rapports archéologiques ont encore pour l'instant l'aspect d'ouvrages sur papier, leur consultation et leur conservation se font d'ailleurs majoritairement sous cette forme. Aussi des images en 2D qui sont des produits dérivés du modèle numérique en 3D se rencontrent de plus en plus souvent dans ces divers ouvrages. Ces images conservent généralement les vues classiques découlant de la projection orthogonale du vestige sur un plan horizontal ou vertical, et permettent ainsi de montrer ses dimensions sans déformation.

L'édition de plan, de coupe, d'élévation à partir d'orthophotographies reste donc dans la logique et les principes des conventions de représentation classiques, connues et partagées par tous. Mais pourquoi faut-il conserver ces conventions? En dehors du fait que l'impression des illustrations se fait toujours en 2D, il ne faut pas oublier que la publication des illustrations est faite (entre autres) pour donner à la communauté scientifique la possibilité de comparer les différents vestiges ou objets, de les mesurer, de les classer selon

de multiples critères, de les organiser dans des typologies. Et pour cela il faut que tous utilisent les mêmes types de vues, orientées et à une échelle donnée. À terme une harmonisation n'est certainement pas impossible à obtenir avec la maquette numérique et ses différents logiciels, mais elle prendra du temps.

Des vues perspectives cavalières ou axonométriques sont également produites à partir du modèle 3D, elles sont sans point de fuite, afin de pouvoir effectuer des mesures justes. À cette fin, une échelle matérialisée par trois axes X, Y, Z gradués doit être associée à la vue, ou à défaut, des cotes doivent tenir lieu d'échelle.

Et précisément, en observant, notamment dans les publications, les images 2D tirées de modèles 3D, on constate que leur nouveauté tend à faire oublier des réflexes pourtant bien acquis dans le domaine de l'illustration scientifique en général, et archéologique en particulier. En effet, toute figure présente des éléments indispensables qui sont une part des exigences attachées à sa valeur scientifique:

- Un titre (quoi, où, quand);
- Une légende;
- Une échelle graphique linéaire ou sous forme de trois axes orthonormés X, Y et Z;
- Une orientation (direction du Nord, orientations cardinales);
- Des sources (à partir de quoi, avec quoi et comment: documents d'origine, matériel, logiciels, méthodes);
- Une signature et une date (qui, quand);
- Une nomenclature (textes dans le dessin);
- Un cadre (limites du dessin/de la représentation);
- La représentation elle-même.

Ainsi, beaucoup d'illustrations tirées de modèles 3D omettent l'échelle et l'orientation, la localisation des coupes sur le plan est également absente. Il est néanmoins très intéressant d'observer le rendu de ces "nouvelles images"<sup>8</sup>: le rendu du vestige est assuré par la variation de la densité des points du levé laser, les parties pleines sont, par exemple, hachurées ou noir, un trait noir ou blanc selon la couleur de fond représente le contour du vestige. On remarque donc qu'en dehors des limites extérieures du vestige, aucune interprétation de ses grands contours intérieurs n'est faite, ce qui complique pour le lecteur l'association mentale du plan et de la coupe.

D'autres représentations plus classiques sont davantage conformes aux règles du dessin scientifique<sup>9</sup>: elles ont échelle et orientation, et juxtaposent logiquement plan et coupe afin d'aider le lecteur à comprendre le volume du

<sup>8</sup> Voir par exemple [http://varjournal.es/doc/varj01\\_002\\_completo.pdf](http://varjournal.es/doc/varj01_002_completo.pdf), pages 118-120, les levés laser de deux complexes funéraires souterrains.

vestige présenté. Les zones non couvertes par le levé sont indiquées, et le rendu de la maçonnerie est laissé comme précédemment au semi de points du laser, sans que des contours aient été “choisis” par l’archéologue. L’inconvénient de ce type de représentation est que les points ne sont pas sélectionnés selon leur appartenance à un plan précis, et leur superposition donne lieu à des représentations conférant au vestige un effet artificiel de transparence pouvant perturber la compréhension de son volume.

Des exemples de représentation d’objets à partir de leur modélisation commencent aussi à se rencontrer dans les publications scientifiques. L’absence d’échelle et de mise en relation des différentes vues (de face, de profil, de dessus, etc.) est encore assez fréquente. Cependant, la DAO permettant le mélange de dessins et de vues issues d’un modèle 3D, la complémentarité du dessin (interprétation subjective indiquant ce qu’il faut voir et comprendre) et du rendu photo-réaliste (objectivité, aspect général de l’objet, sa texture, sa couleur) rend compte visuellement de l’objet d’une façon jusqu’ici inégalée. Cette symbiose du dessin avec l’image virtuelle est une avancée qui semble extrêmement pertinente et prometteuse pour la représentation archéologique. Cependant, ce sont aux céramologues de se prononcer sur l’utilité de ce “mélange” de dessin traditionnel, par exemple à gauche pour la section, et une image numérique pour la partie droite<sup>9</sup>; à eux de nous dire s’ils peuvent s’appuyer sur ces images pour rendre compte de l’identification des céramiques et construire des typologies. De la même façon, ce sont aux lithiciens de dire si les représentations de silex taillé issues de scans peuvent remplacer avec succès le traditionnel dessin à la plume<sup>10</sup>.

#### 4. Conclusion

L’enthousiasme suscité par l’utilisation de modèles 3D en archéologie est très compréhensible, mais il ne doit pas faire perdre de vue que la construction et les usages du modèle numérique issu du levé 3D doivent suivre quelques règles minimales pour garantir la qualité scientifique des travaux archéologiques et des données produites. Le modèle doit être fiable, exploitable par le plus grand nombre, et ne pas permettre la remise en cause de la pertinence des analyses dont il est le support. Pour cela il faut:

– Une représentation fidèle des caractéristiques géométriques et colorimétriques des vestiges, aucun élément ne doit être ajouté, modifié ou retranché;

<sup>8</sup> Rapport ANAMUSCAR, juin 2009, sous la direction de D. Binder et K.-Y. Cotto. Voir en page 14, le plan et les élévations du pont antique des Esclapes (Var), relevé au scanner 3D et CAO: K.-Y. Cotto, Service du Patrimoine, Fréjus; DAO: F. Bertoncetto, CEPAM – UMR6130, Valbonne.

<sup>9</sup> [http://varjournal.es/doc/varj01\\_002\\_completo.pdf](http://varjournal.es/doc/varj01_002_completo.pdf), 134-135.

<sup>10</sup> <http://archaeology.huji.ac.il/depart/prehistoric/leoreg/photo.asp>.

- Une présentation rigoureuse des objectifs scientifiques qui ont conduit à la réalisation du modèle 3D, dans quels buts il a été fait, pour faire quelles observations, sur quelles parties de l'objet réel, pour répondre à quelles questions, pour tester quelles hypothèses;
- La citation des documents, présentation des méthodes, des techniques et des outils utilisés pour le réaliser, ainsi que des paramètres nécessaires à la connaissance de la résolution de la précision, de la fiabilité, de la qualité, et des limites des usages envisageables;
- Une exploitation du modèle en vues 2D ou perspectives suivant les représentations conventionnelles répondant aux règles de l'illustration scientifique;
- Une attention portée à la pérennité du support du modèle, est-on certain aujourd'hui que les fichiers 3D seront encore lisibles dans dix ou vingt ans?

Lorsque l'usage spécifique d'une nouvelle technologie est encore mal connue, on a toujours tendance à chercher à reproduire par son biais ce que l'on faisait auparavant. Ce fut le cas pour les premiers usages de la photographie d'objet, et c'est encore le cas aujourd'hui lorsqu'un logiciel est conçu pour imiter le rendu d'un dessin manuel<sup>11</sup>.

Il n'est pas étonnant que la mise en place d'un consensus de représentation qui soit propre à une nouvelle technologie demande du temps; il faut d'abord être certain de ne pas perdre des informations que l'on a l'habitude de recueillir et d'exploiter, ensuite être prêt à remettre en cause l'utilité de certaines de ces informations, et enfin explorer ce qu'apporte cette nouvelle technologie. L'expérience tirée du passé semble toujours difficile à adapter à notre situation présente. Cependant ce qu'a écrit F. Arago en 1839 à propos de la toute jeune photographie résonne avec une acuité porteuse d'espoirs:

"Quand des observateurs appliquent un nouvel instrument à l'étude de la nature, ce qu'ils en ont espéré est toujours peu de chose relativement à la succession de découvertes dont l'instrument devient l'origine".

Sylvie Eusèbe

Direction scientifique et technique  
Institut national de recherche archéologiques préventives, Paris

## BIBLIOGRAPHIE

- Arago F., *Le Daguerriotype*, Œuvres complètes, éd. J.-A. Barra, VII, 1858, 455-517, 500.
- Mazières F. de, Grubert M. 2011, *Le relevé d'architecture ou l'éternelle quête du vrai*, *Journées internationales d'études (Paris, Cité de l'Architecture et du Patrimoine 2007)*, Lyon, Éditions Lieux-Dits.
- Rocheleau M., *La modélisation 3D comme méthode de recherche en sciences historiques* ([http://ulaval.academia.edu/MathieuRocheleau/Papers/907893/La\\_modelisation\\_3D\\_comme\\_methode\\_de\\_recherche\\_en\\_sciences\\_historiques](http://ulaval.academia.edu/MathieuRocheleau/Papers/907893/La_modelisation_3D_comme_methode_de_recherche_en_sciences_historiques)).

<sup>11</sup> Comme pour ces représentations de céramiques ici: [http://varjournal.es/doc/varj02\\_003\\_completo.pdf](http://varjournal.es/doc/varj02_003_completo.pdf), 61-63.

- Semali A. 2010, *Moyens informatiques de restitution en archéologie monumentale: cas du temple de Karnak*, Thèse de doctorat (<https://papyrus.bib.umontreal.ca/jspui/handle/1866/3905>).
- Sumera F. 2010, *Archéologie du bâti, scanner 3D et ortho-photographie. Vraie réponse ou fausse solution* (<http://www.archeo-lattes.cnrs.fr/spip.php?article499>).
- Vergnieux R. 2011, *L'usage scientifique des modèles 3D en archéologie. De la validation à la simulation*, «Virtual Archaeology Review», 2, 4, 39-43 ([http://varjournal.es/doc/varj02\\_004\\_18.pdf](http://varjournal.es/doc/varj02_004_18.pdf)).

## ABSTRACT

Full graphic documentation finally seems within reach thanks to virtual 3D models of archaeological remains derived from digital photogrammetry or laser acquisition. Considered as a “must” in accuracy, precision, completeness and objectivity, digital models may be used independently of studies planned to be made on these media, unlike a traditional survey specific to the individual study in which it is included. If the technology is well developed, we still need to better distinguish between archaeological observations that are made usable with these digital models and those that are not in reference to direct ground studies. Moreover, in excavation reports and archaeological publications, these virtual models lead to the production of 2D images. Their novelty encourages experimentation by using different renderings, sometimes to the detriment of the scientific value of these images, which has to be guaranteed as a “classical illustration”.

## PHOTOGRAMMÉTRIE APPLIQUÉE À L'ÉTUDE ARCHITECTURALE ET ARCHÉOLOGIQUE, EXEMPLES DE QUELQUES CHANTIERS RÉCENTS EN ÉGYPTÉ

### 1. Introduction

L'application de la photogrammétrie à l'étude architecturale est ancienne. Cette technique sophistiquée de relevé est traditionnellement attachée à des contextes d'inventaire, de restauration, d'auscultation, voire de sauvegarde (Barthelemy, Carbonnell 1985). Il y a peu de temps encore, elle était mise en œuvre exclusivement par des ingénieurs spécialisés.

En raison de coûts élevés, l'intervention des photogrammètres était plutôt orientée vers des édifices et des programmes prestigieux. Le spectre des interventions est aujourd'hui beaucoup plus large puisqu'on constate des implications de la photogrammétrie dans des domaines à la fois plus modestes et variés. Avec le développement conjoint du matériel informatique, des appareils photographiques numériques et des algorithmes de calcul, elle est devenue un outil accessible aux professionnels de l'archéologie (Almagro 1999). L'abaissement considérable du prix de l'équipement et la mise à disposition d'interfaces ouvertes aux utilisateurs expliquent en partie ces changements.

Les outils sont par ailleurs devenus très performants; à titre d'exemple la technique dite "de corrélation dense d'images" permet de produire des modèles 3D d'un objet à partir d'un jeu de photographies. Les techniques d'analyse des images étant en plein essor, les développeurs se sont multipliés, ce qui a eu pour conséquence l'apparition de plusieurs logiciels d'utilisation gratuite ou en open source. Il s'agit là d'un aspect particulièrement intéressant car il autorise une grande liberté créative. Dans ce contexte, l'échange entre les différents acteurs – dans notre cas, le développeur "l'ingénieur" et l'utilisateur "l'archéologue" – ouvre des perspectives de recherche inédites.

Les "transferts de compétence" en matière de relevé, qui peuvent s'opérer au bénéfice des intervenants en archéologie, semblent tout à fait intéressants et prometteurs. Pour l'architecte par exemple, la maîtrise de nouveaux outils de relevés, qu'il mettra en œuvre ou non au gré de son programme d'étude, lui confère des capacités d'analyse inédites. L'accroissement des performances, qu'elles concernent le gain de temps ou la précision, impliquent des changements dans les stratégies d'interventions. Par exemple, la capacité à traiter, dans un certain laps de temps, un plus grand nombre de données permet de s'intéresser à des sujets qu'il n'était autrefois pas concevable d'aborder; l'efficacité modifie le point de vue et ainsi l'intérêt qu'on peut porter à un sujet d'étude.

Afin de mesurer ces enjeux et d'évaluer l'intérêt des techniques de photogrammétrie dans la recherche architecturale, cet article propose de relater l'expérience de quelques chantiers actuellement menés en Égypte: la porte de Tibère à Médamoud, la citerne el-Nabih à Alexandrie, les installations d'Ayn-Soukhna, l'étude d'épaves, etc.

## 2. Les progrès de la photogrammétrie

Depuis que la photogrammétrie a été inventée (au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle), elle a été utilisée dans le domaine de la conservation et l'étude du patrimoine architectural et archéologique. Tant qu'elle a nécessité des investissements en matériel et en personnels très lourds, s'est posée la question de la pluridisciplinarité nécessaire: photogrammètre ou archéologue? Alternative abordée, suivant les périodes et les pays, sous deux angles: sous-traitance des travaux à des entreprises de photogrammétrie, ou formation de départements spécialisés au sein des organismes de recherche archéologique. Les deux approches ont montré leurs limites, manque de connaissance archéologique pour les premiers, poids des investissements pour les seconds.

Depuis une décennie, la situation a été totalement retournée: l'augmentation de la puissance de calcul disponible, la généralisation de la photographie numérique, et le développement de logiciels open source ont rendu envisageable la mise en œuvre directe de la photogrammétrie par chaque chercheur, les investissements nécessaires étant devenus quasi nuls.

Cette révolution amène à se poser plusieurs questions:

- En premier lieu, celle de la formation des archéologues, non seulement à la technique elle-même, mais surtout à la façon d'intégrer les nouvelles possibilités qu'elle offre dans le corpus méthodologique de l'archéologie, comme cela s'est déjà produit par exemple pour les bases de données et les systèmes d'information géographique;
- D'autre part, du côté des développeurs de logiciels de photogrammétrie, celle du développement de logiciels adaptés au travail de l'archéologue.

Tout d'abord, la spécificité de l'application (appareils photo standards, courte distance, axes de prise de vues variés) interdit l'emploi de logiciels généralistes de photogrammétrie cartographique. D'un côté, de nombreux logiciels issus de la recherche sont disponibles, mettant en œuvre des algorithmes très élaborés, mais présentant une ergonomie assez fruste, une documentation succincte et peu d'aide en cas de problème. Se sont également développés des logiciels (ou des services web), très simples d'emploi, mais sans aucun contrôle possible de la qualité du résultat, et produisant un modèle 3D, qui n'est (pas encore) un produit que les archéologues peuvent utiliser dans leur pratique quotidienne.

Entre ces deux extrêmes, il nous a semblé utile de développer une solution intermédiaire, permettant, à partir de plusieurs sources (photographie, station totale, scanner laser), de produire des documents directement utilisables: des redressements photographiques (les plus immédiatement intégrables dans la pratique de l'archéologue), des dessins, coupes et plans vectorisés à partir de photos et de nuages laser, des orthoimages pour les objets plus complexes, des modèles 3D si nécessaire. Ces logiciels, interconnectés, disposent d'une ergonomie simple et efficace, et de nombreux moyens de contrôle de la qualité. Ils seront très prochainement mis à disposition en open source par l'École Nationale des Sciences Géographiques, qui proposera également des moyens de formation spécifiques, dans la continuité des écoles d'été qui se sont tenues ces deux dernières années.

On peut espérer que, en dehors du domaine des recherches archéologiques, ces méthodes pourront se développer de façon importante dans la conservation et surtout dans l'inventaire du patrimoine, qui est un chantier considérable à l'échelle du globe. Les outils existants permettent d'envisager la mise en place d'un inventaire participatif du patrimoine, alliant les techniques d'acquisition basées sur les images à un fonctionnement de type wiki.

Les exemples qui suivent montrent plusieurs applications réalisées en Égypte en mettant en œuvre les différentes possibilités évoquées ci-dessus.

### 3. La porte de Tibère à Médamoud<sup>1</sup>

Le chantier de la porte de Tibère, sur le site de Médamoud en haute Égypte, a fait l'objet de deux courtes missions qui se sont concentrées sur l'étude architecturale du monument. L'occasion s'est présentée d'y expérimenter plusieurs techniques de photogrammétrie, en adéquation avec chacun des contextes, des cas et des problématiques liés au relevé de la porte monumentale. Selon les cas, l'une ou l'autre application a pu se révéler plus performante ou plus rentable.

L'édifice construit sous le règne de Tibère, à l'époque de l'occupation romaine en Égypte, se serait effondré assez soudainement au XVIII<sup>e</sup> siècle. Jusque là, il était sans doute resté dans un état de conservation excellent. Contrairement aux autres monuments du site donc, qui ont été largement pillés au cours des siècles suivant leur abandon, la plupart des blocs provenant de la porte ont été retrouvés, chus au sol. Les archéologues contemporains ont pu les stocker à proximité du monument, les inventorier, les relever et les photographier (Valbelle 1979). Une hypothèse d'anastylose a pu être produite, qui s'est appuyée principalement sur les décors – chacun des blocs est orné sur l'une de ses faces, au moins. Plus encore, la méthode et la

<sup>1</sup> La mission archéologique de Médamoud est dirigée par Dominique Valbelle (Université de Paris IV/UMR 8167/Labex RESMED-IFAO: <http://www.ifao.egnet.net/archeologie/medamoud/>).

patience des chercheurs d'alors a permis de retrouver les positions relatives de bon nombre de blocs, et de restituer ainsi l'ensemble des scènes qui couvraient les deux faces principales Est et Ouest, ainsi que le passage intérieur. Bien évidemment les lacunes sont nombreuses, que les blocs manquent ou que leur face de parement soit endommagée. Pourtant, le caractère plutôt conventionnel et normalisé des scènes représentées – caractéristiques d'un certain standard de l'époque – a permis de dresser un tableau assez complet du programme décoratif.

C'est sur cette base documentaire que D. Valbelle s'est appuyée pour réaliser une étude complète de l'épigraphie du monument. Afin de rendre les résultats de la recherche publiables, il convenait de développer un volet supplémentaire, centré sur la question architecturale. L'idée n'était pas de produire une nouvelle analyse exhaustive de la porte, mais d'en fournir l'image globale et cotée, qui accompagnerait efficacement le propos égyptologique. Nous disposions alors de peu de temps à consacrer à cette tâche sur le terrain, de peu de moyens aussi: l'équipe était réduite à un seul opérateur, qui n'était pas équipé d'échafaudage. Compte tenu de ces conditions, les techniques de photogrammétrie ont semblé les plus appropriées.

Nous nous sommes d'abord intéressés au relevé des structures encore en place, les vestiges des deux montants de la porte. Le plus haut d'entre eux atteint aujourd'hui encore une douzaine de mètres. Les quatre premières assises de ces montants étaient déjà enfouies au moment de l'effondrement: elles sont donc intégralement conservées. Les suivantes sont en revanche très dégradées: seule une partie du remplissage interne est conservée, ainsi que le parement non décoré des faces Nord et Sud. Il s'agissait donc de relever une sorte d'écorché, à la volumétrie plutôt complexe. La stratégie adoptée a été la suivante: on s'est appliqué à dessiner manuellement un plan de coupe situé à deux mètres du sol, sur un canevas de points topographiques; les surfaces globalement planes des faces Nord et Sud ont été relevées par un redressement photographique que l'on a effectué à l'aide d'un objectif calibré, de six points d'appuis topographiques et du logiciel Redresseur. Pour le reste, la technique de corrélation dense d'image s'est imposée pour sa rentabilité dans ce contexte précis: elle réalisait une acquisition rapide des données, tout en permettant de relever des volumes complexes. Le monument étant bien dégagé, on a pu réaliser une série homogène de photographies, comptant une quarantaine de prises de vue convergentes autour du vestige. Seules quelques vues en plongée des faces internes ont pu être réalisées depuis le monument lui-même; l'ensemble des autres clichés ont été pris depuis le sol. On aurait pu envisager de fixer l'appareil photographique à un mât afin d'obtenir un plus grand nombre de clichés plongeants: cela aurait amélioré le croisement des faisceaux, donc la qualité des résultats. Malgré la déficience de la couverture photographique et grâce à la combinaison des

logiciels 123Dcatch<sup>2</sup> et MeshLab<sup>3</sup>, nous sommes parvenus à produire un calcul d'aéro-triangulation ainsi qu'un modèle numérique coloré.

Le modèle obtenu est resté imparfait – en cause les innombrables effets de masques consécutifs aux conditions des prises de vue – bien que tout à fait exploitable: il nous a permis de réaliser une orthoimage de chacune des quatre façades (Fig. 1) ainsi qu'une série de sections des 24 assises de la maçonnerie. Nous avons par ailleurs appliqué la même procédure au relevé des corniches de portes monumentales contemporaines de celle de Tibère, encore sur pied à Karnak. En effet, faute de références graphiques ou bibliographiques suffisantes sur ce sujet, l'établissement d'un corpus comparatif nous était indispensable pour entreprendre l'anastylose de nos deux corniches effondrées. Là encore, les conditions d'acquisition "à la volée" n'ont pas permis d'obtenir des documents extrêmement rigoureux, mais leur qualité était satisfaisante pour ce qui nous intéressait alors: étudier des rapports de proportion et dégager des règles de composition. Nous ne recherchions alors pas tant la précision des données: la technique employée devait nous aider à produire très rapidement des documents comparables (vue orthonormée, échelle identique, etc.).

L'outil de photogrammétrie tel qu'il a été mis en place ici, et la méthode qui en a découlé, ont été aisément transposables à l'étude d'objets de plus petites dimensions: c'est l'un des intérêts majeurs pour nous, qui avons dû procéder, toujours dans le cadre de la restitution des deux immenses corniches, au relevé d'un certain nombre de blocs. En effet, le décor des blocs de couronnement est spécifique: les motifs sont presque exclusivement géométriques, ce qui ne facilite pas les rapprochements – d'autres parties architecturales portant des scènes figuratives ou narratives seraient plus facilement recomposables. Aussi, la géométrie même des blocs ne facilite pas le travail du chercheur qui tente d'en réaliser les assemblages: les volumes sont très hétérogènes et la surface du parement sur laquelle s'imprime la courbure de la gorge n'est pas plane. Cette face décorée restant néanmoins la plus riche en termes de données, il était essentiel de la relever.

Ce projet n'a jamais été entrepris avec les outils traditionnels: il réclamait un investissement trop important. Grâce aux nouvelles applications techniques, l'opération s'est révélée tout à la fois rapide et "rentable". En réalisant entre 5 et 12 clichés, nous avons pu modéliser chacune des faces colorées des blocs de corniche et en produire une orthoimage. Une grande équerre avait été positionnée dans le champ de l'objet, ce qui nous a permis ensuite d'orienter l'objet dans l'espace et d'harmoniser les échelles. Chacune de ces représentations orthonormées a été complétée d'un relevé "schématique" du lit d'attente. Ces dessins comportent un certain nombre d'informations relatives à la localisation de mortaises, à l'existence de trous de pinces ou de traits de scie qui,

<sup>2</sup> <http://www.123dapp.com/catch/>.

<sup>3</sup> MeshLab est un logiciel open source: <http://meshlab.sourceforge.net/>.

Fig. 1 – Orthoimage de la face Sud du montant Nord de la Porte de Tibère à Médamoud, Égypte (E. Laroze, UMR 8167 du CNRS).

Fig. 2 - Planche analytique d'un corpus de blocs de corniche de la Porte de Tibère à Médamoud (extrait). Chaque bloc, représenté par une orthoimage et une vue en plan est positionné selon ses caractéristiques sur une assise hypothétique. Cette méthode permet de confronter la mitoyenneté entre deux blocs et éventuellement de retrouver sa place d'origine dans la construction (E. Laroze, UMR 8167 du CNRS).

par confrontation, pourront aider à rapprocher certains blocs. Chaque bloc représenté en orthoimage et dessiné en plan, est systématiquement positionné selon ses caractéristiques sur un niveau d'assise potentielle (Fig. 2). Une méthode rigoureuse a donc été mise en place, qui permettra éventuellement de rétablir certaines continuités entre les blocs. L'étude n'est pas terminée mais la procédure a d'ores-et-déjà conduit à valider des connections.

Enfin, toujours sur le même chantier, les techniques de photogrammétrie ont été appliquées à une problématique encore très différente: la réalisation d'un plan de dépôt lapidaire. Il n'est en effet pas rare, sur les sites archéologiques, de se trouver confronté aux problèmes d'inventaire et de localisation des blocs errants. La réalisation de tels plans de dépôt est une entreprise ambitieuse: elle demande des investissements importants que ne peuvent pas toujours se permettre les missions. À Médamoud, la mise à disposition d'une grue a été une opportunité: une trentaine de clichés zénithaux ont été pris rapidement à partir de l'engin positionné au milieu de l'aire de stockage, qui, une fois exploités, ont produit une orthoimage de la zone. L'image est de qualité médiocre, mais reste tout à fait suffisante pour répondre à notre objectif: dessiner un fond de plan sur lequel positionner les numéros des blocs. Une fois ceux-ci numérisés dans un logiciel de dessin, leur géoréférencement

#### 4. La citerne el-Nabih à Alexandrie<sup>4</sup>

Située dans les jardins de *Shallalat*, la citerne el-Nabih est l'un des grands réservoirs publics édifiés à la fin de la période médiévale, que compte encore la ville d'Alexandrie (March, Borel 2009; Hairy 2009). C'est sur ce chantier, conduit par le Centre d'Études Alexandrines, que notre équipe a expérimenté, dans le courant de l'année 2008, les techniques de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie pour compléter et reprendre les levés manuels précédemment réalisés. Cette démarche visait également à mettre en évidence les pathologies et désordres structurels de la citerne dans le cadre de sa conservation.

L'acquisition tridimensionnelle de l'existant, qu'il s'agisse de l'édifice ou des sondages archéologiques, a permis de nourrir de manière exponentielle la documentation de terrain. L'étude architecturale et archéologique s'en est ainsi trouvée enrichie. Au moment où débute la rédaction de la monographie consacrée à cet édifice, nous pouvons dresser le premier bilan de l'apport de ces techniques à notre discipline (Borel *et al.* 2010; Borel 2012).

Jusqu'à-là, les représentations graphiques découlaient des choix opérés sur le terrain. Il n'était pas rare, lors de la phase de post-fouille, que l'on regrette de ne pas avoir choisi un autre axe pour une coupe ou que l'on s'aperçoive que l'on avait omis de prendre telle ou telle cote, etc. Avec les modèles tridimensionnels obtenus grâce à l'acquisition par lasergrammétrie<sup>5</sup> ou par photogrammétrie<sup>6</sup>, et après traitement<sup>7</sup> des données brutes issues de ces techniques, on peut ainsi disposer d'un fac-similé du monument et de son contexte. On peut alors "interroger" ce fac-similé et, grâce aux outils informatiques, produire de nouveaux documents graphiques loin du chantier (Fig. 3a-b).

La documentation obtenue par ces techniques nouvelles permet d'élargir le champ d'investigation et d'aller plus loin dans la construction du discours

#### 5. Les bateaux carbonisés d'Ayn-Soukhna<sup>8</sup>

Le site d'Ayn-Soukhna, dont la fouille est dirigée par M. Abd el-Raziq, G. Castel et P. Tallet, se trouve sur la côte Ouest du golf de Suez (Abd el-Raziq *et al.* 2002, 2007). Sur l'invitation de P. Pomey, en charge de l'étude des

<sup>4</sup> [http://www.cealex.org/sitecealex/navigation/FENETR\\_NAVetudes\\_F.htm](http://www.cealex.org/sitecealex/navigation/FENETR_NAVetudes_F.htm)

<sup>5</sup> Pour ce chantier, le scanner utilisé est un Trimble GX™.

<sup>6</sup> Les reconstructions tridimensionnelles basées sur la méthode de la corrélation dense de photographies ont été réalisées avec le logiciel MicMac, développé par M.P. Deseilligny (<http://www.micmac.ign.fr/>).

<sup>7</sup> Les différentes phases de traitement des nuages de points issus du scanner ont été réalisées avec les logiciels Cap, Comp3D, Cumulus et Redresseur. Tous ces logiciels ont été conçus et développés par Y. Egels.

<sup>8</sup> <http://www.ifao.egnet.net/archeologie/ayn-soukhna/>.

a

b

Fig. 3 – a. Sections horizontales tous les 25 cm sur l'ensemble du chantier (L. Borel, CEALex; Y. Egels, IGN); b. Orthoimage partielle de la paroi intérieure Ouest de la cuve montrant l'état de conservation de l'enduit de mortier de tuileau (L. Borel, CEALex; Y. Egels, IGN).

navires (2000 av. J.-C.) retrouvés démontés et entreposés dans les galeries G 2 et G 9, nous avons été amenés à mettre en place un protocole pour effectuer des relevés par photogrammétrie de l'ensemble des vestiges mis au jour.

Dans le cas présent, l'étude d'archéologie navale, qui implique l'analyse des différents éléments constituant ces embarcations et l'organisation de leur stockage, était rendue très ténue du fait de l'état de conservation des bois. Réduits à l'état de charbon, ces derniers ne pouvaient être démontés sans per-

a

b

Fig. 4 – a. Orthoimage et sections d'un des ensembles prélevés dans la galerie G 2 (L. Borel, CEAlex);  
b. Nuage de points de la galerie G 9 montrant les vestiges carbonisés en place des éléments de bois  
qui constituaient le navire (L. Borel, CEAlex).

dre la lecture de l'organisation du plan de dépôt. Avant notre intervention, le navire de la galerie G 2 a été relevé manuellement en planimétrie puis déposé en plusieurs ensembles afin d'être étudié plus en détail.

Pour la galerie G 9, il a été convenu de conserver les vestiges en place afin de les mettre en valeur ultérieurement. Le contexte particulier de la galerie ne permettant pas de prise de vue zénithale avec un grand éloignement par rapport aux charbons, notre choix s'est porté sur la technique de la corrélation dense. Les prises de vue ont été effectuées suspendu à la structure de l'échafaudage mis en place pour soutenir le plafond de la galerie. Un grand nombre de clichés a été nécessaire en raison du cadrage serré entraîné par le manque de recul.

Le procédé utilisé a permis d'obtenir un nuage de points de cette volumétrie à la géométrie complexe, et ce, avec une grande résolution. La suite de logiciels open source utilisée se compose de Sift, Bundler, CmvS et Pmvs<sup>9</sup>. La triangulation et l'exploitation de ce nuage ont été réalisées avec MeshLab. Pour répondre aux besoins de l'étude, ce modèle tridimensionnel a permis d'extraire des sections, des élévations, des vues en plan de l'ensemble des bois entreposés. Le plan global des éléments démontés qui composent le navire et du contexte archéologique associé a pu être réalisé (Fig. 4).

Dans ce cas particulier où il n'est pas possible de toucher les vestiges sans risquer de les endommager, le modèle 3D autorise la prise de cotes. La manipulation de ce dernier dans un logiciel approprié permet d'obtenir des points de vue qu'on ne peut pas avoir dans l'environnement naturel où est entreposé le navire.

## 6. Conclusion

Forts de notre expérience en archéologie terrestre, nous avons eu l'opportunité de mettre en œuvre la technique de la corrélation dense d'images dans le cadre de fouilles sous-marines sur des épaves. Là plus qu'ailleurs, le temps d'intervention sous l'eau étant limité, l'emploi de ces techniques prend tout son sens et ouvre de grandes perspectives dans le domaine de la recherche en archéologie navale.

Laurent Borel

USR 3134 CNRS

Centre d'Études Alexandrines, Alexandrie

Yves Egels

École Nationale des Sciences Géographiques, Marne-La Vallée

Emmanuel Laroze

UMR 8167 CNRS

Centre de Recherches Égyptologiques de la Sorbonne, Paris

<sup>9</sup> <http://grail.cs.washington.edu/software/pmvs/>.

## BIBLIOGRAPHIE

- Abd el-Raziq M., Castel G., Tallet P., Passera N., Gout T.-F., Menassa L., Zaza K. 2002, *Les inscriptions d'Ayn Soukhna*, MIFAO 122, Le Caire, Institut français d'archéologie orientale.
- Abd el-Raziq M., Castel G., Tallet P. (eds.) 2007, *L'exploration archéologique du site d'Ayn Soukhna (2001-2004)*, in J.-Cl. Goyon, Chr. Cardin, *Proceedings of the Ninth International Congress of Egyptologists (Grenoble 2004)*, OLA 150, Louvain, Peeters, 61-68.
- Almagro A. 1999, *Photogrammetry for everybody*, XVII CIPA International Symposium on Architectural Photogrammetry, Recife (Brasil) (<http://digital.csic.es/bitstream/10261/19824/1/SymposiumCI-PAOlinda.pdf>).
- Barthelemy J., Carbone M. 1985, *Conservation, restauration et documentation, l'apport de la photogrammétrie architecturale*, Icomos Information n. 2, 3-14 ([http://www.icomos.org/publications/ICOMOS\\_Information/1985-2.pdf](http://www.icomos.org/publications/ICOMOS_Information/1985-2.pdf)).
- Borel L., Cabarro M., Dubourg S., Egels Y. 2010, *D'X, Y à X, Y, Z, de nouveaux outils pour l'étude architecturale et archéologique. Restitution 3D, lasergrammétrie et photogrammétrie: le cas de la citerne el-Nabih à Alexandrie*, in *Actes du Colloque Virtual Retrospect (Bordeaux 2009)*, Bordeaux, Ausonius Éditions, 215-228.
- Borel L. 2012, *La citerne el-Nabih à Alexandrie: un exemple d'utilisation de la photogrammétrie, de la lasergrammétrie et du modèle 3D sur un chantier de fouille archéologique*, «RFPT», 196, 21-30.
- Hairy I. 2009, *Du Nil à Alexandrie, histoires d'eaux*, Catalogue d'exposition, Alexandrie, Harpocrates.
- March Chr., Borel L. 2009, *Citerne el-Nabih, un dispositif remarquable de l'hydraulique alexandrine*, in Hairy 2009, 420-443.
- Valbelle D. 1979, *La porte de Tibère dans le complexe religieux de Médamoud*, in *Hommages à la mémoire de Serge Sauneron I*, BiEtud, 81, Le Caire, 73-85.

## ABSTRACT

The application of photogrammetry in archaeology has developed greatly in the last ten years. A short while ago, the technique was confined to prestigious operations because it required sophisticated and expensive technical means. Nowadays, it can be used by all operators thanks to the increase in computer hardware and the development of specific software, such as those based on the close-range photogrammetric technique. The democratization in the use of these powerful, fast and accurate tools allows users to increase the number of surveys and opens, at the same time, new research perspectives. In addition, the ability to manage more data in a short time makes it possible to deal with new topics that were previously difficult to face, while their efficiency changes the standpoint and the interest on the subject. Nevertheless, such changes involve developing new intervention strategies and working methods. Photogrammetric processes have been implemented on three recent archeological programs in Egypt: the Tiberius Gate at Medamoud, the el-Nabih cistern in Alexandria, the Ayn-Soukhna charred boat. The efficiency and the interest of photogrammetric solutions have been tested on these various fieldwork contexts.

## LA MODÉLISATION 3D DE GRANDS ENSEMBLES MONUMENTAUX DE LA RESTITUTION AU PUBLIC À LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

### 1. Introduction

Ce propos s'appuie sur l'expérience acquise ces dernières années lors d'opérations portant sur deux grands ensembles monumentaux d'Indre-et-Loire: le château de Chinon (Dufaÿ 2011) (Fig. 1) et le prieuré Saint-Cosme dans la banlieue de Tours (publication en cours) (Fig. 2), appartenant tous deux au Conseil général. Ces sites sont médiévaux, mais les problématiques seraient les mêmes pour d'autres périodes.

Il ne s'agit pas ici de présenter des méthodes expérimentales ni d'entrer dans des considérations techniques pointues. Je me place du point de vue de l'archéologue confronté à ces nouveaux outils, qui essaie de dépasser l'émerveillement vis-à-vis de restitutions toujours plus belles (et plus onéreuses...). Ce point de vue de l'utilisateur non-spécialiste – et aussi du décideur, en tant que responsable d'une structure archéologique – permet peut-être de prendre quelque recul par rapport à des technologies en pleine évolution.

Comme toute technique, la modélisation 3D est un outil, elle doit être adaptée aux objectifs en vue desquels elle est utilisée. Or il me semble que, souvent, ceux-ci sont mal définis: soit ils sont informulés, soit ils sont paradoxaux (pour l'archivage **et** pour la restitution **et** pour la recherche **et** pour le grand public **et** riches formellement **et** simples à manipuler, très beaux **et** pas chers, etc.).

On peut distinguer deux objectifs principaux pour les restitutions 3D: la présentation au public d'états disparus de réalités passées, et l'aide à la compréhension des vestiges lors de l'analyse par les chercheurs. Ces deux domaines ne doivent pas nécessairement s'opposer, mais il convient de bien apprécier la part relative de chacun lorsqu'on décide de mettre en chantier une 3D; et de bien définir ce qu'on attend de la restitution, que ce soit comme instrument pédagogique ou de recherche.

### 2. La restitution au public

C'est l'objectif le plus ancien et le plus évident, celui qui en général permet d'obtenir les budgets, notamment auprès des élus, légitimement soucieux du retour de l'information vers les publics, et gestionnaires de nombreux monuments historiques.

Je voudrais proposer ici trois thèmes de réflexion:

– L'importance de l'échelle de représentation, qui va de la maquette à l'immersion du spectateur dans l'image virtuelle, de la plus petite échelle à l'échelle 1;

Fig. 1 – Vue générale aérienne de la ville de Chinon en 2006, au début des fouilles et des travaux de restauration. La forteresse domine la ville et La Vienne (photo Cyb'Air Vision: <http://www.cybairvision.com/>).

Fig. 2 – Vue générale aérienne de la fouille du prieuré Saint-Cosme à La Riche en cours de fouille, en 2010 (photo Cyb'Air Vision).

- La question de la périodisation, ou comment rendre compréhensible l'évolution des sites;
- L'interactivité du public avec les restitutions.

### *2.1 De la maquette à l'immersion*

Il existe plusieurs types de restitution, qui ne doivent pas être confondus. Ils ont chacun leurs codes de représentation, en fonction de l'échelle choisie et du niveau de réalisme souhaité. Naturellement, la technicité, les coûts et les délais de mise en œuvre ne sont pas les mêmes.

La plus petite échelle est la maquette, qui peut être une maquette "blanche", à l'instar de celles que les architectes destinent à la simple compréhension des volumes d'un projet. Une telle maquette peut être suffisante lorsqu'il s'agit de représenter de grands ensembles, comme des villes ou des complexes monumentaux. Elle est même souvent inévitable, dans la mesure où le niveau de détail des données n'est pas homogène, certaines parties étant mieux connues que d'autres. Elle permet en effet de lisser le niveau d'information et de produire une représentation homogène.

C'est le parti qui a été choisi pour le château de Chinon (Fig. 3). Suite à une dizaine d'années de fouilles et de recherches, il s'est agi en 2010 de restituer au public, dans une nouvelle muséographie, le résultat de ce travail. Sur un site de 3,5 ha, et même si la fouille en a concerné 25%, ce qui est considérable en milieu castral, tous les secteurs ne sont pas également documentés. Plutôt que de présenter des zooms, des niveaux d'hypothèses ou des "blancs", toujours difficiles à comprendre, on a préféré une vue d'ensemble, par le biais de maquettes informatiques 3D sur une borne interactive.

D'autre part, la restitution peut être plus ou moins détaillée: représentation des ouvertures, des modénatures, des sculptures. Ce choix ne se réduit pas à la présence ou à l'absence, mais concerne aussi le niveau de réalisme des éléments. Elle peut être aussi plus ou moins texturée et éclairée, avec là encore des niveaux de réalisme variables.

Ce type de restitution est en cours de mise en œuvre au prieuré Saint-Cosme (Fig. 4). Sa fouille quasi-exhaustive a été réalisée en 2009-2010. Elle était destinée à redonner aux visiteurs la perception des lieux en tant que monastère médiéval, et non seulement comme demeure du poète Pierre de Ronsard (qui y est mort en 1585 et est enterré dans l'église).

Le projet de restitution a été proposé dès le début de la fouille, car le site se prête parfaitement à ce type d'entreprise:

- C'est un ensemble partiellement conservé en élévation, mais dont il manque d'importants éléments. Ainsi, que ce soit pour l'archéologue ou le visiteur, la relation entre l'existant et le virtuel est facilitée.

Fig. 3 – Maquette 3D de la forteresse de Chinon au XV<sup>e</sup> siècle, présentée dans une borne interactive. Cette maquette est manipulable: le public peut la faire tourner et zoomer. En cliquant sur les triangles rouges, il accède à des fiches de commentaires avec des photographies. Il y a quatre maquettes de cette nature, pour quatre époques différentes. Modélisation avec le logiciel 3ds Max: M. Brard, MZone Studio, infographie pour la borne: MGDesign (<http://www.mgdesign.fr/index.php?l=fr&p=31>).

Fig. 4 – Deux aspects de la restitution 3D du prieuré Saint-Cosme de La Riche au XIV<sup>e</sup> siècle. Modélisation avec le logiciel 3Ds Max: P. Mora, Université de Bordeaux 3 Michel de Montaigne, UMR Ausonius/CNRS Archéovision-Archéotransfert (<http://archeotransfert.cnrs.fr/>).

– C’est un lieu touristique justifiant d’un effort de restitution au public. Il faut noter toutefois que le volet “valorisation” a été disjoint, car on a préféré attendre la réalisation du modèle pour définir son usage grand public et les produits de sortie. Il a donc été admis qu’il s’agissait d’abord d’un outil de travail pour les archéologues, qui leur permette de tester leurs hypothèses. L’avantage de cette démarche est de pouvoir s’appuyer sur un modèle abouti pour réfléchir à son usage pédagogique. L’inconvénient est qu’il faudra relancer la machine à décisions et trouver de nouveaux budgets.

Quant au niveau de détail, on a choisi de restituer toutes les ouvertures, les modénatures principales, mais sans réalisme pour les chapiteaux (qui sont tous des clones de quelques enveloppes générales), ni sculpture figurative. La texture fine et les lumières élaborées sont renvoyées à la phase ultérieure d’exploitation du produit.

À l’autre extrémité de la chaîne des échelles de restitution, nous pouvons aller jusqu’à l’immersion dans la réalité virtuelle. Je n’ai pas d’expérience dans ce domaine précis, d’ailleurs prometteur. Le plus loin que nous sommes allés est la réalité augmentée, au château de Chinon. Trois tableaux ont été réalisés (Fig. 5). Ils ne sont pas aussi aboutis que ceux de Cluny par exemple, et ils sont fixes. En revanche, signalons cette particularité qu’ils sont “habités” par des personnages mobiles réels incrustés dans l’image de synthèse, comme des scènes cinématographiques, destinées à évoquer l’échelle des lieux et la vie qui pouvait s’y dérouler.

## *2.2 La question de la périodisation*

Il n’est pas si fréquent de réaliser des projets de restitution 3D qui prennent en compte la dimension du temps, en présentant l’évolution spatiale du site.

Pour Saint-Cosme, il a été décidé de faire une restitution à trois moments-clé de l’histoire du prieuré: à la fin du XII<sup>e</sup> siècle (l’apogée de l’état roman), au milieu du XIV<sup>e</sup> siècle (l’apogée tout court), et à la fin du XVI<sup>e</sup> siècle (l’état qu’a pu connaître Ronsard).

Pour Chinon, quatre moments-clés ont été choisis, du XI<sup>e</sup> au XV<sup>e</sup> siècle. Les quatre maquettes sont présentées sur une borne interactive, mais accessibles séparément, sans qu’il y ait de possibilité de visualiser l’évolution. L’avancement ultérieur de l’étude archéologique a montré qu’il aurait fallu en faire sept ou huit. Le discours historique s’en trouve parfois un peu compliqué à suivre, pour comprendre l’évolution de la logique spatiale de l’ensemble. On a donc essayé un autre mode de visualisation, avec des couleurs (Fig. 6). Ce qui est ajouté à chaque phase est représenté par une couleur nouvelle, on voit que sur certaines phases il a fallu mettre deux ou trois couleurs (ceci ne figure pas dans la muséographie et a été préparé en vue de la publication).

Fig. 5 – Deux des trois tableaux de réalité augmentée réalisés pour la muséographie de la forteresse de Chinon: vues des logis royaux au XV<sup>e</sup> siècle. En haut, l'existant, en bas, la restitution. Modélisation 3D: S. Kolton pour Drôle de Trame (<http://www.droledetrame.com/exposition/forteresse-royale-de-chinon>).

### 2.3 *L'interactivité*

L'interactivité peut être de trois types:

- La manipulation du modèle (le “faire tourner”);
- Le parcours dans le modèle (immersion à plus ou moins grande échelle);
- La consultation d'une base de données associée qui renseigne certains éléments du modèle.

L'interactivité du public avec les modèles de Saint-Cosme n'est pas encore définie, elle le sera dans la phase “valorisation”. Il a seulement été décidé de ne rendre parcourable que l'intérieur que l'église, considérée comme le noyau du monastère, ceci aux trois époques définies. Il faut dire que les deux autres plus importants bâtiments, le réfectoire des moines et le logis du prieur, sont toujours debout et sont donc parcourables “en vrai”.

Pour Chinon, l'interactivité consiste à pouvoir manipuler le modèle (le “faire tourner” et zoomer, mais pas le parcourir). On peut aussi consulter une base de données associée qui, lorsqu'on clique sur de petits triangles rouges, fournit des fiches illustrées sur les éléments architecturaux concernés (Fig. 3).

Fig. 6 – La 3D aide à comprendre l'évolution de sites complexes comme la forteresse de Chinon (infographie: B. Dufaÿ, avec le logiciel Sketchup, à partir des modèles de M. Brard).

### 3. Le rôle de la 3D dans la recherche archéologique

Si le rôle de la 3D dans la panoplie des outils de valorisation n'est plus contesté, il n'en va pas de même de son rôle dans la recherche archéologique. Trop souvent encore, les restitutions sont réalisées après l'étude d'un site, et

pensées seulement en termes d'illustrations perfectionnées, pour une publication ou une muséographie. Il ne s'agit que de "belles images", entachées des péchés de réalisme et de séduction. Elles iraient à l'encontre des exigences de la recherche, discours mouvant appuyé sur des preuves ingrates et des raisonnements complexes.

Or la 3D permet d'améliorer notre vision et notre compréhension de la réalité disparue: elle a une valeur heuristique. Mais il faut aussi poser la question du rapport entre le réel et le modèle, car les limites entre les deux peuvent se brouiller. La 3D risque de faire disparaître le réel derrière le virtuel (le mythe du site dans son ordinateur). À l'inverse, le réel risque d'envahir le virtuel (modéliser c'est simplifier pour comprendre).

### 3.1 *La valeur heuristique des restitutions*

La réalisation d'un modèle 3D oblige l'archéologue à penser en 3D. Cet apparent truisme a énormément d'implications.

En effet, dans la majorité des cas, l'archéologue raisonne sur des vestiges qui sont quasiment en deux dimensions, tant leur élévation est faible. C'est particulièrement vrai dans l'archéologie préventive à dominante rurale, où les sites sont arasés, mais aussi en milieu urbain où les niveaux anciens sont très lacunaires.

Or, pour comprendre réellement les structures auxquelles nous avons affaire, il faut en restituer les élévations. Cela permet de résoudre des problèmes de chronologie relative, car des vestiges qui ne se recoupent pas de façon évidente à la fouille peuvent s'avérer incompatibles en élévation. Surtout bien sûr, cela aide à caractériser les structures, à établir leur typologie, leur mode de fonctionnement et leur usage.

On voit bien, par exemple, les progrès faits sur l'architecture en terre et en bois grâce à la 3D, avec des restitutions de plus en plus fouillées de bâtiments dont il ne nous reste que des trous de poteau. C'est vrai aussi des structures techniques, comme les fours, dont on gagnerait sans doute à modéliser davantage le fonctionnement, que ce soit pour la poterie ou la métallurgie.

Mais c'est vrai même des structures bâties relativement bien conservées, car les restitutions 3D, cohérentes pour une phase, permettent une vision "nettoyée" d'ensembles en général hétérogènes.

La 3D oblige à porter attention aux circulations, notamment aux circulations verticales dans les bâtiments, souvent oubliées. Trop souvent, les archéologues restituent les vestiges comme autant de structures indépendantes, sans se poser la question de leurs interrelations, de leurs accès réciproques et des voies de circulation qui peuvent les desservir, ou les éviter.

J'en veux pour exemple le travail que nous avons mené sur le château de Chinon, grand ensemble ayant évolué sur deux millénaires, avec une logique qui peut s'apparenter à celle d'une ville. La 3D a obligé à réfléchir sur les

Fig. 7 – Un exemple d’analyse des circulations facilité par l’emploi de la 3D: l’accès à la forteresse de Chinon par l’est au début du XIII<sup>e</sup> siècle (infographie: B. Dufaj, avec le logiciel Sketchup, à partir d’un modèle de M. Brard).

rappports entre les différents bâtiments, et sur la manière de pénétrer dans le château, selon que l’on soit piéton, cavalier ou charretier (Fig. 7). Le résultat de cette réflexion a été la décision que, dans les maquettes, les seuls détails ont été les portes, afin de faire comprendre au public les modes de circulation.

La 3D aussi a entraîné l’obligation d’homogénéiser le niveau d’information, que ce soit en restituant des parties manquantes, ou au contraire en simplifiant des éléments encore en élévation. Le résultat de ce lissage a été très positif, puisqu’il a permis une “vue d’ensemble”, et ce pour chaque époque.

Je voudrais insister sur la dimension heuristique de cette “vue d’ensemble” qui, à première vue, peut paraître une sorte de pis-aller en l’absence d’informations détaillées. Ce concept a été proposé par Pierre Bayard (Bayard 2012), à propos des lieux qui sont évoqués dans les textes littéraires. Il peut être utilement transposé à notre perception des lieux archéologiques, sur lesquels notre métier est d’écrire.

La «vue d’ensemble» est la «vision synthétique d’un être ou d’un objet, qui ne s’arrête pas au détail, mais tente d’en saisir, au-delà des apparences, l’essence profonde» (Bayard 2012, 158). Elle est le résultat d’une opération de sélection du point de vue, qui permet d’éviter de se perdre dans l’anecdoti-

que, «de privilégier à l’aveuglette tel ou tel point secondaire du lieu traversé, rencontré de manière aléatoire» (*ibid.*, 38).

On ne saurait mieux décrire le danger qui nous guette à cause de nos modes d’approche parcellarisés du terrain, dont l’ouverture est conditionnée si souvent par les hasards de l’aménagement du territoire, avec des fouilles faites dans des délais contraints. Mais cette sorte d’échantillonnage, comme «la circulation rapide dans un lieu, [permet] d’en apercevoir la diversité», ce qui «est un moyen d’éviter les généralisations trop rapides en donnant à penser sa complexité, et ce qui, en elle, échappe à la synthèse». Alors, «la rapidité est le gage de l’ampleur de la vision» (*ibid.*, 40), leçon que nous serions parfois avisés de retenir lorsque, le nez sur nos trous de poteau ou nos stratigraphies, nous privilégions le détail au détriment de l’ensemble.

Enfin, la «vue d’ensemble» implique le choix d’un scénario privilégié (et la 3D oblige particulièrement à ce choix, puisqu’il n’y a pas d’image conditionnelle, comme on écrit une phrase au conditionnel, sauf à embrouiller la perception à un point tel qu’il vaut mieux ne pas faire de restitution). La «vue d’ensemble» est un «guide», un «itinéraire», qui protège du «risque de s’égarer dans le foisonnement des possibles, sans se donner les moyens d’une synthèse» (*ibid.*, 40). Elle est même le moyen d’éviter «les lieux communs», «le jugement collectif» (pour nous, les comparaisons typologiques mal maîtrisées, les arguments d’autorité), si le point de vue est assez élevé pour ne pas «suivre un parcours préétabli par l’avis général de [nos] prédécesseurs, parcours dans lequel [nous risquerions], en s’absorbant dans la communauté des opinions, tout autant qu’en s’égarant dans l’infini des détails, de manquer le lieu» (*ibid.*, 39).

Pour servir de guide, cette vue d’ensemble doit reposer sur une conception systémique des lieux, qui amène à «percevoir ses lignes de force organisatrices» (*ibid.*, 40). On doit faire le pari d’une logique du site, même si celle-ci est complexe et résulte d’une combinaison d’actions humaines rationnelles, de contraintes et de jeux d’acteurs, de phénomènes de résilience et d’héritage. Ce postulat, seul, permet de comprendre des organisations humaines, que ce soit un habitat, une forteresse de la taille de celle de Chinon, une ville ou un réseau. Ainsi, le travail sur les maquettes a permis de proposer un modèle d’évolution en 2D, qui est le résultat du travail avec la 3D, et non l’inverse (Dufajë 2012) (Fig. 8).

### 3.2 *Le rapport entre le réel et le modèle*

Les réflexions précédentes ont montré la nécessité de penser le rapport entre le modèle et ses utilisateurs, chercheurs ou “grand public”. Il convient aussi de penser le rapport entre le modèle et la réalité qu’il représente.

Le sens du mot “modèle”, tel qu’il est employé à propos de la 3D, n’est pas tout-à-fait celui utilisé en science: il ne s’agit pas d’un modèle explicatif,

Fig. 8 – Modélisation de l'évolution du site de la forteresse de Chinon (conception et DAO B. Dufay).

bel et bien d'une représentation de la réalité, telle qu'on la restitue à partir des traces que cette réalité a laissés. Le terme restitution me paraît mieux convenir, le terme "modèle" ayant une prétention scientifique à mon sens un peu usurpée.

Toutefois, comme pour le modèle au sens scientifique du terme, la question se pose de son rapport avec la réalité. Comme pour le modèle scientifique, ce rapport est variable et il est construit. Mais, contrairement au modèle scientifique, il ne détermine pas sa valeur explicative. Un plus ou moins grand niveau de détail ou de justesse impacte seulement sa valeur descriptive.

Je pense qu'il faut avoir présentes ces nuances à l'esprit, car il me semble que l'on court le risque de confondre modèle perfectionné et bonne science, comme on a pu confondre enregistrement de terrain hyper-détaillé et compréhension dudit terrain. En réalité, c'est plutôt l'inverse, l'enregistrement ou le modèle trop détaillé noyant la structure sous l'anecdote.

C'est le danger qui nous guette dans nos tentatives d'un enregistrement totalement exhaustif par le biais de techniques d'acquisition numériques, comme lorsque nous appelons "cartes" des images qui ne sont que des photographies verticales habillées de quelques traits et de trois toponymes. Il faut redire que le scan 3D n'est pas une méthode de compréhension. C'est une méthode de délocalisation de l'analyse, avec une perte de données, car il ne remplace pas le contact direct avec le monument, tactile et visuel.

Cette problématique du relevé numérique est très importante, à cause de l'évolution rapide des technologies et de leur accessibilité. Je pense que ces pratiques doivent être assorties d'une importante réflexion avant de les mettre en œuvre. C'est la conséquence évidemment de ce qui vient d'être dit concernant les rapports de l'image numérique avec la réalité, qui entraîne une illusion de transportabilité du réel. Si cela semble évident pour le relevé de cavités, grottes et galeries aux géométries aléatoires et dont la "peau" est le sujet même de l'étude, je ne suis pas sûr que, pour des bâtiments, le jeu en vaille toujours la chandelle.

Il existe une autre illusion, qui est celle de la pérennité de ces données (difficultés du transcodage pour suivre l'évolution des standards et des lecteurs, du stockage physique des données, etc.). Des solutions vont sans doute émerger, mais force est de constater que, pour l'instant, le problème n'est pas vraiment résolu.

De ce point de vue, la modélisation tridimensionnelle par corrélation d'images photographiques me paraît très prometteuse, car elle se fait à partir d'images en 2D, dont la mise en 3D se fait à la demande, ce qui permet de rester en phase avec les évolutions logicielles. Evidemment, le stockage des photographies numériques pose aussi des problèmes, mais me semble-t-il mieux maîtrisés (et on peut même utiliser des images non numériques).

J'ai testé ces deux approches. Pascal Mora (ArchéoTransfert) l'a utilisée avec succès pour les élévations du prieuré Saint-Cosme, ce qui a évité la mise en œuvre d'un scan 3D.

Quant au scan 3D, nous l'avons mis en œuvre à Chinon en 2005-2009, avec Bertrand Chazaly (société ATM3D). Il a ainsi scanné environ 300 mètres de remparts (Fig. 9), et un certain nombre de bâtiments. Ces opérations devaient avoir tous les avantages qui ont été signalés dans ce colloque. Mais, force est de constater qu'il n'en a rien été: impossibilité de lire des fichiers trop lourds par nos machines standards, logiciels inadéquats, temps de manipulation très long pour sortir deux coupes bien plus vite réalisées à la main, bref, l'aspect 3D ne nous a pas servi.

Seules, les orthophotographies qui accompagnaient l'opération ont pu être texturées et recalées avec une grande précision géométrique. Elles ont facilité l'étude du bâti. Elles ont aussi été utilisées par les entreprises de restauration des maçonneries, en complément de leur calepinage qui, ainsi, a pu être plus sommaire.

En conclusion, je voudrais aborder deux points plus particuliers. D'abord, celui du rapport géométrique entre le réel et le modèle. Celui-ci simplifie forcément, à un niveau qui doit être réfléchi avant d'entreprendre sa construction. Aucun bâtiment ancien, et encore moins aucun paysage, n'est composé de volumes simples. Nous devons les décomposer en de telles unités artificielles.

À Chinon, la question ne s'est pas trop posée, car en partant d'emblée sur des maquettes, notre niveau de simplification était grand. Mais nous aurions gagné du temps à faire encore plus simple. Nos bâtiments et nos tours respectent le plus souvent les plans réels. Le résultat est qu'il n'a pas été possible de construire des parallélépipèdes ou des cylindres réguliers, avec toutes les complications que cela entraîne pour les toitures, notamment, sans compter la multiplication du nombre d'arêtes, et donc la lourdeur du fichier.

À Saint-Cosme, restitution plus détaillée, nous n'avons pas trop été gênés tant que nous sommes restés dans les états romans, de géométrie simple et construits assez régulièrement. En revanche, la tâche s'est révélée plus ardue lorsqu'il a fallu modéliser l'église gothique, avec les nervures de voûtes absolument irrégulières. Nous aurions gagné du temps si nous avions régularisé le plan de l'église.

Dans la mesure où aucune problématique ne reposait sur cette régularité ou non, je pense que cela aurait été pertinent. De toute façon, les ruses qui ont dû être employées pour faire tenir l'ensemble ne permettent pas d'envisager l'étude scientifique d'une telle voûte à partir de la 3D (et cela aurait été un tout autre programme).

Le deuxième point, c'est qu'il faut dire que nos restitutions de bâtiments sont souvent "volantes", elles ne reposent pas sur des sols modélisés correcte-

Fig. 9 – Orthophotographie d’une partie du rempart Nord de la forteresse de Chinon en 2008 (B. Chazaly, ATM3D).

Fig. 10 – Modèle numérique de l’éperon rocheux qui constitue le site de la forteresse de Chinon (levé topographique: F. Marteaux et Y. Couturier, SADIL; réalisation du MNT avec le logiciel ArcGIS: F. Marteaux, SADIL; infographie du modèle 3D: B. Dufaÿ, avec le logiciel Sketchup, à partir d’un modèle de M. Brard qui a repris le MNT d’ArcGIS sous 3ds Max).

ment. Le sol est soit carrément absent, soit arbitrairement plat ou très simplifié. De mes discussions avec divers collègues, j’ai constaté que cette insertion des modèles dans le sol qui les supportait était rarement envisagée.

Or la logique spatiale d’un ensemble comme un prieuré ou un château dépend étroitement du relief. L’attention portée aux pentes, aux marches et escaliers, aux murs terrasses, etc., est fondamentale pour leur compréhension. Il convient donc de modéliser les sols, et dans les cas les plus complexes, de

réaliser un véritable “modèle numérique de terrain”, comme nous l’avons fait à Chinon sur toute l’étendue de l’éperon rocheux (Fig. 10).

De plus, ce sol varie avec le temps, et si l’on fait des modèles périodisés, le sol doit l’être aussi. À Saint-Cosme, l’exhaussement du monastère pour échapper aux crues de la Loire au XV<sup>e</sup> siècle a dû ainsi être pris en compte; à Chinon, c’est l’effondrement des coteaux ou le creusement de douves.

#### 4. Conclusion

Ce tour d’horizon montre la richesse de l’utilisation des restitutions 3D, non seulement pour la présentation au public ou la publication de nos études, mais aussi dans la démarche même de la recherche archéologique.

Je fais le pari que, de même qu’en dix ou quinze ans l’emploi des SIG est devenu incontournable, il en sera de même dans dix ans pour la 3D, jusque sur les chantiers de fouille.

Il faut donc que les archéologues s’approprient cet outil, sans tomber dans ses pièges. Il faut aussi que les développeurs et les modélisateurs mettent au point des outils logiciels plus simples et accessibles. Ils doivent créer des passerelles pour que nous puissions, au quotidien, utiliser ces outils.

Bruno Dufaÿ

Conservateur du Patrimoine  
Conseil général d’Indre-et-Loire, Service de l’Archéologie  
UMR 7324 CITERES/LAT  
Université François-Rabelais de Tours-CNRS

#### BIBLIOGRAPHIE

- Bayard P. 2012, *Comment parler des lieux où l’on n’a pas été?*, Paris, Editions de Minuit.  
Dufaÿ B. 2011, *Une forteresse auscultée, bilan de sept années de fouilles*, in F. De Foucaud (ed.), *Chinon, le destin d’une forteresse*, Chinon: les Amis du Vieux Chinon, BAVC hors-série, 84-103.  
Dufaÿ B. 2012, *L’évolution des châteaux, à la recherche des logiques spatiales*, in G. Bischoff, J.-J. Schwiene (eds.), *Les châteaux-forts en France*, «Les Dossiers d’Archéologie», 349, 74-81.

#### ABSTRACT

This paper proposes an experimental feedback on the use of various forms of 3D restorations of monumental complexes. We refer in particular to a castle (Chinon) and a monastery (Saint-Cosme in La Riche, near Tours), two historic monuments that are the property of the General Council of Indre-et-Loire. 3D restorations are generally intended for the general public, but their interest also involves archaeological research, by allowing scholars to test hypotheses and visualize buildings in their original aspect. They also impose a synthetic vision of monumental large sets that are unevenly documented, and allow a better comprehension of their general organization and evolution. Whatever their objective is, they can have several levels of detail and can be associated with databases which supply further information. According to budget, extension, archaeological knowledge of the monuments to be modelled and the desired educational aim, solutions are diverse and can go from the simple model to the dumping in the virtual image, via various levels of detail. By foreseeing all the operational questions before launching a project of 3D restoration, it is possible to reach the intended goals at the lowest cost.

## DÉVELOPPEMENT D'UN SIG 4D POUR LA VILLE MÉDIÉVALE DE CLUNY

### 1. Introduction

L'abbaye de Cluny, qui fut la plus grande église de toute la chrétienté au XII<sup>e</sup> siècle, a connu des modifications tout au long de son histoire. L'évolution du site peut être étudiée à partir d'une abondante documentation, ainsi que par les données de fouilles archéologiques et par l'étude du paysage. La complexité stratigraphique des constructions qui se succédèrent depuis le X<sup>e</sup> siècle et l'étude du territoire en relation avec son réseau hydrographique nous ont amené à concevoir une méthode SIG d'exploitation des données.

La mise en place d'une future plateforme collaborative interdisciplinaire, dite SIG 4D, dédiée à l'histoire et l'archéologie des paysages clunisois nécessite le regroupement de données très diverses, souvent incompatibles entre elles. L'intégration d'éléments en 3D et leur géolocalisation dans la base de données géographiques soulève des difficultés techniques que nous tentons de résoudre. A partir de l'étude documentaire et des fouilles, nous examinons les questions soulevées par les usages interdisciplinaires de données SIG et CAO hétéroclites, et par leur diffusion sur Internet auprès d'une communauté de chercheurs variés. Les outils numériques offrent des possibilités nouvelles qui nous encouragent à élaborer des chaînes de traitement et de diffusion des données qui soient mieux adaptées à la nature hybride des objets archéologiques et au processus d'étude des traces de l'histoire dans les objets bâtis et les territoires.

### 2. Etude documentaire concernant l'enceinte de Cluny

L'étude documentaire et le résultat des fouilles archéologiques permettent de dégager trois grandes étapes dans le développement du bourg de Cluny (Fig. 1).

#### 2.1 *Première étape*

Une première étape apparaît autour de l'an mil, avec un bourg situé à la porte du monastère (Duby 1950), sur la colline occidentale où se trouve l'église paroissiale dédiée à saint Mayeul. Par la suite le bourg devient une véritable ville en colonisant les espaces placés contre le mur Sud du monastère, le long du ruisseau et du chemin menant à la Grosne. De nouvelles chapelles sont créées qui deviendront des églises paroissiales (Sainte-Marie et Saint-Odon dans le futur faubourg Saint-Marcel).

Fig. 1 – a. Vue de Cluny depuis le Nord, gravure par Née d'après un dessin de J.B. Lallemand, XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> s. (Musée d'art et d'archéologie, 76.199); b. Abbaye et ville de Cluny, gravure de Louis Prévost, vers 1670 (Bnf); c. Cluny, farinier et tour du moulin, photo de K.J. Conant (Musée d'art et d'archéologie).

Un premier noyau abbatial, peut-être de forme relativement circulaire, était ceinturé d'une enceinte dont une partie a été retrouvée sous le transept de Cluny III. En effet, un morceau de l'ancien rempart de Cluny II subsiste en fondation (h 1,60 m × l 2,10-2,30 m), élément qui peut être daté grâce à une monnaie placée comme dépôt de fondation. Il s'agit d'un denier de Tournus, émis à la fin du X<sup>e</sup> siècle, en circulation jusqu'au XII<sup>e</sup> siècle (Conant 1968; Baud 2003, 57).

Trois documents du X<sup>e</sup> siècle font allusion aux murs de Cluny. Le diplôme de Lothaire III (985) mentionne le *castrum monasterri* et précise que seul l'abbé peut y exercer sa domination. Le procès-verbal du synode d'Anse (994) et une charte de Cluny (n° 2255) distinguent explicitement le monastère et le bourg de Cluny (*castrum vel in burgus*). Quant au précepte de Robert le Pieux, daté entre 996-1002 (Mehu 2001, 173-177), il délimite une zone autour de Cluny où il est interdit de construire des châteaux. Cette aire circulaire s'étend tout autour de l'abbaye, jusqu'à Mâcon, Chalon, Mont-Saint-Vincent, Charolles et Ajoux (au Sud). L'aire de pureté est également proclamée par le légat pontifical Pierre d'Albano en 1080, et correspond aussi à la zone sans péage délimitée par le pape Pascal II en février 1107 (Mehu 1999, 330).

Il est difficile de savoir si le bourg de Cluny était déjà entouré d'une enceinte maçonnée. Peut-être qu'une palissade en bois suffisait à protéger le bourg jusque vers 1040 (Conant 1968).

## 2.2 Deuxième étape: fin XI-début XII<sup>e</sup> siècle

La construction de la nouvelle abbatale Saint-Pierre-et-Saint-Paul (Cluny III), à partir de la fin du XI<sup>e</sup> siècle va modifier sensiblement l'ampleur des bâtiments monastiques (Fig. 1b). La nouvelle basilique, longue de 187 mètres, devient ainsi la plus grande de toute la chrétienté médiévale et permet de répondre à l'afflux des pèlerins. Cette gigantesque construction amena un développement des activités dans toute la ville, et une augmentation progressive de la population. Les nombreuses maisons romanes et gothiques conservées le long du mur Sud de l'enceinte de l'abbaye et dans la partie Ouest, en témoignent. Dès la fin du XI<sup>e</sup> siècle, le développement du bourg de Cluny va prendre un nouvel essor, en lien avec son territoire environnant.

Plusieurs documents attestent de la présence des murs. Le coutumier de l'abbaye, *De descriptione Cluniacensis Monasterii*, intégré dans le *Liber Tramitis aevi Odilonis*, rédigé sous l'abbé Odilon vers 1030, cite l'enceinte du monastère, comprenant deux portes, situées à l'Ouest de l'enceinte, distantes l'une de l'autre de 280 pieds. Le document mentionne aussi deux tours, l'une au niveau de la sacristie, plutôt au Nord du monastère, et l'autre vers la boulangerie (Baud 2003; Baud, Rollier 2010). Les coutumes d'Ulrich et de Bernard, rédigées vers 1080, parlent à plusieurs reprises du *castellum* de

Cluny et de ses portes. En cas d'urgence les reliques des saints étaient portées hors du monastère et deux chantres devaient amener l'eucharistie «jusqu'aux portes du château». Les chartes de Cluny (Bernard, Bruel 1876-1903; Mehu 2001, 350-354), datées entre 1044 et 1120, mentionnent l'abbaye de Cluny entourée de grands murs et de portes (*major murus*). La présence massive de reliques fait de Cluny un lieu saint, un véritable *castellum*, une forteresse spirituelle par rapport au monde extérieur (Mehu 2001, 352). Le *castellum* et ses portes jouent également un rôle important lors des processions et des déambulations de reliques (Mehu 2001, 351). À cette époque, le *castellum* désigne davantage un espace clos et symbolique, selon une terminologie courante jusqu'au XI<sup>e</sup> siècle (Mehu 2001, 352).

La présence d'une double enceinte – autour du monastère et autour du bourg – est attestée dans un texte de 1126, alors que l'abbé Pons de Melgueil, est réinstallé à la direction de l'abbaye (Mehu 2001, 352). La formulation du texte indique clairement qu'il y avait deux types de murs: ceux du *castellum* dressés autour du domaine abbatial, comprenant les églises, le cloître, les bâtiments conventuels et les ateliers monastiques, et ceux du bourg (*burgus*) pourvus de clôtures (*claustra*). Le terme de *claustra* et non *muri* indique sans doute que l'enceinte du bourg n'était pas maçonnée, mais peut-être une palissade de bois ou, plus simplement, des bornes délimitant le territoire de l'agglomération. Des traces fort ténues de fossés, attribués aux X-XI<sup>e</sup> siècles, ont été repérées au Nord-Ouest de la ville, peut-être des restes de ces clôtures légères (Rollier 1993, 13).

### 2.3 Troisième étape: fin XII<sup>e</sup>-XV<sup>e</sup> siècle

Il semblerait que la construction d'une enceinte en pierre autour du bourg se situe sous l'abbatit de Thibaud I<sup>er</sup> (entre 1179-1183), pour remplacer une palissade plus légère (Mehu 2001, 591).

Le système des dîmes qui existe vers 1100, avec l'apparition des paroisses à Cluny, permettait tout d'abord de verser des fonds à l'abbaye pour célébrer l'anniversaire de l'abbé Hugues et nourrir l'ensemble du couvent. Par la suite, en 1179-1180 les dîmes furent en quelque sorte détournées de leur usage habituel, pour financer la construction des murs de la ville, renforçant ainsi la cohésion spatiale et symbolique de la communauté civile.

La mise en place du tracé définitif de la muraille de la ville, avec ses portes et ses tours, fut réalisée durant la deuxième moitié du XIV<sup>e</sup> siècle. En 1363, le duc de Bourgogne, Jean le Bon ordonne au bailli de Mâcon de réparer l'enceinte de la ville de Cluny et de mettre en place un corps de garde. A cette époque les Clunisois obtiennent du roi l'autorisation de lever un impôt indirect pour reconstruire et consolider les murailles. Au XIV<sup>e</sup> siècle l'entretien et la garde de l'enceinte de Cluny ne concerne plus l'abbé et les religieux. Ce

sont les habitants du bourg et le roi, unis par un intérêt commun, qui doivent s'en charger.

En 1377, alors que les conflits entre la France et l'Angleterre reprennent, le roi Charles V répond à une supplication des Clunisois qui demandent à réserver une part de l'impôt royal sur les marchandises vendues dans le bourg, pour les travaux sur les murailles. Les bourgeois conservent désormais le sixième du montant de l'impôt royal (soit deux deniers par livre perçue) (Mehu 2001, 727).

Au XV<sup>e</sup> siècle, c'est un impôt sur la consommation de vin, touchant la quasi-totalité de la population du bourg, qui permet de financer les frais des fortifications. Même si la taxe est faible, tous les Clunisois ne sont pas contribuables potentiels. Les moines et tous leurs officiers ont exemptés du suchet et des taxes sur les marchandises. A plusieurs reprises, les bourgeois demandent d'ailleurs l'abolition de ces privilèges (Mehu 1999, 730).

#### 2.4 *L'enceinte dans son état actuel*

Dans son état actuel l'enceinte médiévale de l'abbaye est très morcelée, avec des tronçons à l'Ouest (porte saint-Mayeul et porte du Merle), au Sud, autour de la porte de Mâcon, et au Nord à la hauteur de ses raccordements au mur de l'abbaye, au niveau de la tour de Butevaux et jusqu'à la tour Fabry.

L'enceinte était longue de près de 1400 mètres et entourait un espace de 13 hectares (Rollier 2012). Plusieurs grands tronçons subsistent pratiquement jusqu'au sommet de leur élévation. L'enceinte a subi d'importantes transformations au XVIII<sup>e</sup> siècle, comme par exemple le mur oriental, détruit au profit d'une clôture maçonnée percée d'une porte monumentale et repoussée plus à l'est.

Certains secteurs de l'enceinte sont relativement bien connus, tandis que d'autres parties mériteraient des relevés d'élévation, pour mieux connaître leurs étapes de construction. Plusieurs murs sont cachés dans des maisons et sont peu accessibles pour l'étude, tandis que d'autres parties ont bénéficié d'études archéologiques, fournissant ainsi des bases fiables pour une reconstitution virtuelle. La restitution 3D permet ainsi de visualiser les parties existantes et les parties disparues.

### 3. Documentation graphique et textuelle

Une quinzaine de vues du site de Cluny nous renseignent sur différentes parties de la ville et de l'abbaye. La confrontation entre ces documents et les vestiges montre qu'ils sont souvent imprécis ou peu fidèles. Le plus ancien document graphique est une gravure de Louis Prévost, réalisée en 1672 (BNF) montrant Cluny depuis le Nord (Fig. 1b). Le dessinateur a procédé à une sorte d'étirement de la perspective, ce qui lui permet de présenter la

majorité des bâtiments marquants de l'abbaye et de la ville. Une «Vue de l'abbaye de Cluny, depuis le Nord», par Emile Sagot (XIX<sup>e</sup> s.) et un dessin de Jean-Baptiste Lallemand (XVIII<sup>e</sup> s.) représentent la porte monumentale de la Chanaise, au Nord de la ville, que l'on peut comparer à d'autres portes médiévales, notamment celles de Gruyères et Noyers-sur-Serein. Emile Sagot représente la porte munie de deux tours, alors que Jean-Baptiste Lallemand indique une structure plus simple.

La description de la ville faite par le docteur Benoît Dumolin, entre 1749 et 1774, donne des indications intéressantes concernant les remparts: «L'enceinte de Cluny est d'environ 3860 pas communs. Ses murs flanqués de 15 tours placées à distance inégales ont été revêtus de bons fossés secs, ils sont percés de 7 portes» (Dumolin 1750).

Tous ces documents aident à reconstituer les remparts, les portes et les tours, mais de nombreuses questions subsistent quant aux détails des fortifications.

#### 4. Les plans-terriers du XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècle

Une autre source documentaire importante est celle des plans-terriers de la ville, établis au XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècle. Les plans du notaire Bollot, dressés en 1693 (dim. 64,5×48,5 cm) (Rollier 2009), sont constitués de 71 plans, établis en deux échelles différentes, avec une première échelle de 200 pieds<sup>1</sup> pour la ville et une échelle de «150 pas géométriques de 5 pieds de roy» pour les environs (folio 21). Parmi ces documents, il y a plans qui intéressent Cluny intra-muros, mais aussi le Sud de la ville (entre les plaines de l'Etang Neuf et le mur de la ville, le coteau oriental, les terres placées à l'Ouest et au Nord de Cluny) (Rollier 2009, 482).

Les plans-terriers dressés au XVIII<sup>e</sup> siècle sont plus petits (dim. 35,5×24 cm) et ne sont pas datés précisément, mais le type d'écriture permet d'envisager une date avant 1738 (Rollier 2009, 483). Ces plans constituent un ensemble de quelque 600 documents papier qui assurent la couverture cartographique d'un territoire d'environ 20 km<sup>2</sup> autour de Cluny. Il s'agit de représentations précises, avec des mesures obtenues par triangulation, des parcelles possédées par l'abbaye et du type de culture appliquée sur chacune d'elle. De nombreuses mentions complètent le document, avec des indications sur le type de culture, le nom du tenancier de la parcelle.

Une sélection de 114 plans terriers du Clunisois permet d'aborder la problématique de reconstitution du bourg monastique, mais les dimensions

<sup>1</sup> Avant 1668, le pied du roi ancien est généralement de 32,66 cm. En 1668, le pied du roi fut modifié par Colbert lorsqu'il réforma la toise de Châtelet.

différentes des deux groupes de plans posaient un problème de lecture et d'interprétation.

## 5. Assemblage et géolocalisation des plans

Les documents évoqués ci-dessus ont été numérisés, de manière à pouvoir les comparer, les assembler et les superposer. Concernant les plans Bollot et les plans-terriers, un important travail d'assemblage a dû être effectué pour obtenir une vue d'ensemble de la ville. Il s'agissait ensuite de pouvoir intégrer toutes ces données dans le modèle SIG existant et en relation avec les édifices qui subsistent encore dans la ville.

Pour les plans terriers, la première étape a été leur géoréférencement dans un cadre de référence actuel. Il s'agissait tout d'abord de trouver des points homologues dans le paysage (angle de maison, puits, tours, carrefours, ponts, etc.) entre le document du XVIII<sup>e</sup> siècle et le fond de carte actuel, une orthophoto de l'IGN de 1997 à 50 centimètres de résolution et une orthophoto à cinq centimètres de résolution réalisée par IGO/aérodata pour ce projet. Nous avons choisi de remonter dans le temps au niveau cartographique en utilisant une étape intermédiaire, avec les planches du cadastre napoléonien du XIX<sup>e</sup> siècle, qui constituent une excellente étape entre nos deux données initiales. Nous avons donc géoréférencé le cadastre napoléonien du XIX<sup>e</sup> siècle, qui se superpose parfaitement, sur le cadre du XX<sup>e</sup> siècle, obtenant ainsi la superposition du XVIII<sup>e</sup> siècle sur le paysage actuel (Grosso 2010, 22-24). Afin de garder les formes et les relations spatiales intègres et aussi proches que possibles du plan original, le géoréférencement a été effectué avec une transformation affine (Boutoura, Livieratos 2006, 60-70).

Pour tous les géoréférencements, nous avons noté les coordonnées des points d'amers utilisés, ainsi que le décalage entre le plan et la réalité de terrain, afin d'informer sur le niveau de précision du processus. Nous ne savons pas comment ces plans ont été réalisés et quels étaient les critères de représentation, les instruments et les méthodes de cartographie étant différents nous avons beaucoup d'erreur dans la géométrie. De plus, beaucoup de ces plans ont servi comme documents de travail et ont été souvent manipulés au cours du temps, avec des découpages, recollages, toilages qui ont déformé le papier. Les conditions de stockage des documents ont également créé des déformations à cause de l'humidité, des pliures, des trous. Tout ceci s'additionne au décalage de la cartographie initiale et explique des décalages pouvant aller jusqu'à quatre mètres et le fait que les plans ne correspondent pas complètement entre eux.

Tout ce travail concerne des données images ou raster qui ne sont "que" visuelles. Pour commencer l'élaboration du Système d'Information du SIG et pour faire apparaître des données, nous avons créé une couche vecteur com-

prenant toutes les limites des plans pour chaque corpus. Au travers de cette démarche, les documents sont analysés et connus dans le détail. A partir de cette première évaluation, nous avons élaboré une méthodologie de géoréférencement pertinente pour des plans anciens hétérogènes.

## 6. Zone test d'expérimentation: le farinier de l'abbaye

Pour tester notre méthode, nous avons choisi une zone centrale de la ville, relativement bien documentée. Située contre le rempart Sud de l'abbaye, la tour du moulin est placée sur une petite rivière, le Médasson, qui traverse toute la ville de Cluny et permet aux artisans d'exercer leurs activités. Le farinier et la boulangerie de l'abbaye (Fig. 1c) occupent une position clé dans le bourg monastique, au cœur du réseau hydraulique de la ville. L'étude des élévations du mur pignon Sud du farinier et la liaison avec le farinier permettent de placer les bâtiments vers le milieu du XIII<sup>e</sup> siècle, ce qui correspond aux données historiques. En effet la chronique de Cluny rédigée en 1480 par François de Rivo (*Chronicum Cluniacense*) donne quelques indications sur la mise en place d'installations hydrauliques par les abbés (Riche 2000). Selon ce document, c'est Yves de Vergy (1257-1275) qui aurait construit les greniers contre la tour des moulins, construction qui correspond en partie au bâtiment actuel du farinier (Rollier 2009, 471).

Une description du XVIII<sup>e</sup> siècle, due au docteur Benoît Dumolin, (Dumolin 1750) donne des indications intéressantes sur l'organisation de la ville et la gestion de l'eau. Il signale plusieurs fois les canaux d'un système hydraulique complexe. La rivière nommée le Médasson se sépare en deux conduites, l'une pour alimenter le moulin abbatial, l'autre pour évacuer les eaux du quartier des tanneries (Rollier 2009, 467). L'érudit constate aussi l'insalubrité des rues où passe le bief du moulin abbatial.

Plusieurs opérations archéologiques ont été menées sur le rempart jouxtant le farinier et une thèse a été réalisée sur le système hydraulique médiéval de Cluny, ce qui rend ce secteur très intéressant sous plusieurs aspects. La géolocalisation de cette zone test nous permet de réfléchir à une méthode de travail utile à tous les chercheurs.

L'étude archéologique du mur pignon du farinier et de l'enceinte indique plusieurs étapes de construction (Rollier 1999). La chronologie relative suppose un premier état de la tour du moulin qui est associé au mur d'enceinte, puis, durant le XIII<sup>e</sup> siècle, une seconde étape voit l'établissement de la tour et par la suite la mise en place du farinier. Une partie de cette chronologie est confirmée par la documentation (*Chronicum Cluniacense*) qui situe la construction des greniers contre la tour du moulin sous l'abbatiat d'Yves de Vergy (1257-75). L'étude archéologique montre la grande homogénéité de la courtine Sud, sur toute la longueur conservée (126 m), entre le farinier et

la tour Butevaux. L'enceinte, peu épaisse (90-95 cm), est munie de merlons (L 1×10,95×0,40 m), tout en laissant un espace de circulation étroit (0,55 m), probablement muni d'un platelage en bois (Rollier 2012).

Pour compléter notre restitution virtuelle, nous avons également tenu compte d'un dessin à la plume de Balthazar Hubert De Saint-Didier (début XIX<sup>e</sup> siècle) qui montre le Moulin et cellier de l'abbaye dans un état antérieur (Cluny, coll. part., dim. h 20×25,5 cm; Maurice 1988, 36), avec les fenêtres médiévales plus petites, encore perceptibles dans la maçonnerie actuelle. Cet état du bâtiment est rendu visible dans notre restitution 3D, au moyen d'un curseur temporel.

Notre maquette tridimensionnelle (Fig. 4) tient aussi compte des remaniements intérieurs du farinier, que l'on connaît par une description, nommée dénombrement de 1623, due au frère Du Chastrelet, cellierier de l'abbaye (Conant 1968) qui décrit l'ensemble en ces termes: «La tour des moulins, divisée en quatre étages, ayant au dessous un moulin où passe l'eau des quatre moulins, couverts de tuiles plates, en forme de pavillon de 36 pieds en carré. Les grands greniers quaronnés sans lambris, occupant le plus haut étage, le farinier au milieu voûté, et le bas planché de simples ais, le bas étage un cellier sans voûte dont le plancher est d'ais porté par divers poteaux, soutenus de divers piliers en bois, ont 165 pieds de longueur sur 45 pieds de largeur, ayant trois appentis sur les portes et escaliers couverts de tuiles plates comme le sont lesdits grands greniers» (Conant 1968, 39).

Dans la restitution des bâtiments en 3D, nous avons séparé les différents éléments (murs, planchers, toitures, etc.), de manière à offrir un outil souple pour les utilisateurs (architectes, archéologues, historiens, guides). De nouveaux relevés pourront ainsi être intégrés dans le modèle 3D, en distinguant les matériaux (pierre, bois, carreau, tuile, etc) et les étapes de construction

## 7. Exploitation des données 2D, intégration des données 3D, de 3ds Max à TerraExplorer Pro

Afin de répondre aux besoins des archéologues qui souhaitent consulter et comparer des informations 2D et 3D à différents niveaux de précision, une plateforme web collaborative utilisant le logiciel TerraExplorer Pro est en cours d'élaboration. Cet outil permet de rendre cohérents l'information géographique et la visualisation 3D. Pour la restitution 3D, la méthode consiste à importer dans 3ds Max différents plans et tracés AutoCAD au format DWG, ainsi que différentes sources images (élévation, coupes) qui servent au travail de modélisation à l'échelle. L'objet 3D est ensuite exporté au format 3DS. Dans TerraExplorer Pro, une couche de points est créée. Chaque point matérialise la position future, d'un objet 3D une fois importé.

## 8. Gestion des plans AutoCAD de la ville de Cluny

Nous disposons de différents plans AutoCAD de la ville de Cluny dressés par un géomètre dont le PSMV (Plan de Sauvegarde et de Mise en Valeur). Celui-ci intègre différentes couches de données historiques que nous exploitons. Dans 3ds Max le système d'unité métrique est configuré. Après une importation fichier par fichier, il apparaît qu'un seul plan se positionne assez loin du centre de l'univers 0-0-0 de 3ds Max. Il s'agit du plan de Cluny de nos jours.

Les positions de plusieurs sommets sont comparées à celles observés sur les couches vectorielles représentant le même tracé dans TerraExplorer Pro. À l'aide du logiciel CIRCE de l'IGN, il est assez simple d'effectuer des conversions et de vérifier la précision de l'importation dans 3ds Max. Après vérifications, les coordonnées XY de ce plan AutoCAD proviennent du système de coordonnées géographiques Lambert 2 centre (Fig.3)

Cette première information majeure va nous permettre de connaître les coordonnées X et Y du vertex de notre choix directement dans l'interface de 3ds Max. Les données historiques contenues dans le PSMV sont essentielles, (anciens alignements de façades, ou emprises de bâtis disparues, etc.), si bien qu'il faut caler ce plan sur celui de Cluny de nos jours. De nombreux problèmes d'affichage et des ralentissements apparaissent lorsque 3ds Max doit gérer une grande quantité de sommets (vertex), qui plus est à une si grande distance finale du centre 0-0-0. Nous devons optimiser ces tracés pour faciliter leurs positionnements. Cette optimisation est fastidieuse, mais essentielle, car les tracés sont importés sous de nombreuses couches (layers) dans 3ds Max, leur gestion, en l'état, est complexe.

L'optimisation commence dans la fenêtre de réglage lors de l'importation dans 3ds Max. Ce travail se poursuit manuellement, en utilisant les couleurs d'objets et la légende pour relier/attacher les tracés identiques sur les différents plans, ce qui permet d'améliorer la lecture et la manipulation des données. Nous sommes passés de plusieurs milliers d'éléments AutoCAD (block, ligne, etc.) à seulement 13 couches d'informations, que l'on peut afficher et masquer à volonté. Nous positionnons l'ensemble de ce tracé historique "au-dessus" du plan de Cluny de nos jours. Quelques rotations et déplacements sont nécessaires pour caler ce plan (Fig. 4).

## 9. Organisation des objets de la maquette 3D et modèle conceptuel de données

L'organisation des données 3D tient compte de l'évolution du bâti au cours du temps (modifications, destructions, changement de fonction). Afin d'obtenir un découpage logique des éléments structurant un ensemble cohé-

Fig. 2 – Méthodologie du projet SIG 4D (Arts et Métiers ParisTech, Z. Petty).

rent, différentes hypothèses de transformations architecturales sont étudiées et les relations hiérarchiques entre les éléments d'architectures sont identifiées (Fig. 3).

Un modèle de description sémantique et syntaxique de l'objet est formalisé à partir de ces hypothèses. Il s'articule autour du classement Mérimée<sup>2</sup>, de la norme ISO 3166-2 pour la situation géographique et des méthodes provenant de la CAO (Fig. 3).

## 10. La modélisation architecturale 3D

Les techniques de modélisation polygonale et de création des textures sont celles de l'industrie du jeu vidéo. Les contraintes de la modélisation sont assez semblables, la finalité étant l'intégration de ces modèles à un moteur 3D, celui du visualiseur TerraExplorer. Des textures carrées sont réalisées à l'aide de nombreuses sources documentaires numérisées (plan au sol, élévation, coupe)

<sup>2</sup> <http://www.culture.gouv.fr/culture/inventai/patrimoine/>.

Fig. 3 – a. Coordonnées Lambert 2. Du tracé AutoCAD au SIG (Arts et Métiers ParisTech, A. Mazuir); b. Naming, hiérarchie, gabarit (Arts et Métiers ParisTech, A. Mazuir).

qui sont mises aux proportions dans le logiciel Photoshop. Dans 3ds Max le tracé de la zone de travail est dupliqué et ramené en coordonnées 0-0-0 pour corriger les problèmes de précision dans les manipulations, ou opérations d'édition des objets. À l'aide de prises de mesures sur site, complétées par des

Fig. 4 – Modèle 3D intégré à TerraExplorer (Arts et Métiers ParisTech, A. Mazuir).

relevés archéologiques, et par la lecture des cotes sur les plans du géomètre, les gabarits constitués de simple plan 2D reçoivent les textures issues de Photoshop et sont mis à l'échelle dans 3ds Max (Fig. 3). La modélisation est plus aisée dans les vues orthogonales (face, dessus, gauche) (Fig. 4) mais un bâtiment n'est jamais parfaitement orienté selon les axes Nord-Sud et Est-Ouest. Une rotation de son tracé au sol et des gabarits de modélisation est nécessaire afin d'aligner les différents plans d'élévations aux vues de travail correspondantes. Ainsi les vues de face, gauche, droite ou arrière dans 3ds Max, nous permettent d'observer les façades correspondantes dans leur alignement. La valeur d'angle relevée lors de cette rotation sert ensuite de donnée attributaire pour l'orientation de l'objet dans le SIG. Divers restitutions, répondant à des besoins identifiés, accroissent l'efficacité du travail de comparaison, de réflexion sur une thématique. Nous proposons des représentations en 3D complètes, des coupes et des éclatés 3D. La végétation et le modèle numérique de terrain sont conçus et modifiés selon les mêmes principes. Aux outils d'analyse de TerraExplorer peuvent s'ajouter des simulations de dynamiques des fluides. Réalisées avec un logiciel comme RealFlow de la société Next Limit, les animations précalculées, auxquelles l'on rajouterait une matière sous 3ds Max, seraient en fait un maillage polygonal "organique" qui se déformerait selon l'environnement 3D et les forces auxquelles il serait soumis au préalable dans 3ds Max et RealFlow. Le dispositif hydraulique de Cluny, dont la tour du moulin fait partie, sera également simulé.

Le géo-référencement dans TerraExplorer Pro utilise le point de pivot de l'objet 3D. Ce pivot de manipulation est placé, à l'aide des outils d'accrochage de 3ds Max, sur un sommet (vertex) du maillage (mesh). Le sommet est choisi dans la géométrie de l'objet polygonal "parent" (le bâti) et tous les "enfants" (plancher, fenêtres, charpente) héritent du même placement pour leur pivot respectif. Un sommet correspondant à celui des couches vectorielles du PSMV peut-être choisi. L'avantage de ce choix est la précision du placement de l'objet qui reprend la position d'un sommet existant sur ces tracés de Cluny. Deux pistes sont explorées: la position au sol ou la position au niveau des toits (un relevé de points altimétriques peut être employé à cet effet). Les objets sont ramenés en coordonnées 0-0-0 pour l'exportation au format 3DS, le pivot étant placé sur un sommet qui ne correspond plus au centre de création de l'objet primitif (boite, cylindre, etc.) utilisé au départ de la conception. Un "rendu en textures" d'Ambiant Occlusion permet d'ajouter de la qualité visuelle aux modèles. Ce baking permet d'optimiser l'affichage dans le visualiseur TerraExplorer (l'ambient occlusion est possible en temps réel, mais s'avère gourmand en ressource). Le choix des représentations des informations dans les textures (relevé pierre à pierre, phases de construction, cartographie des matériaux) est primordial, et s'ajoute à celui de la photo projetée (Fig. 4). Un développement des UV bien effectué permet de constituer le "patron" qui servira à la réalisation de ces textures. Un mélange (blending) de textures à la surface de l'objet 3D pourra améliorer les possibilités de lecture, d'interprétation des données à l'intérieur du visualiseur TerraExplorer.

## 11. L'intégration dans TerraExplorer Pro

Dans TerraExplorer Pro, une couche de points est créée selon l'échelle (bâtiments, rue, quartier, ville, etc.) ou la thématique désirée (fonction d'un bâtiment, activité artisanale d'un quartier, etc.). Un point sur cette couche représente la position du pivot de l'objet 3D à importer. L'objet est importé, placé automatiquement à l'échelle dans Terra Explorer Pro. L'optimisation pour l'affichage de l'objet avec création des niveaux de détail ou LOD (Level Of Detail) se fait avec un outil spécifique, qui transforme dans un format plus léger la géométrie 3D. Les fichiers LOD au format XPL remplacent les fichiers 3DS et l'affichage progressif est configuré manuellement afin d'optimiser le chargement dans la fenêtre selon la distance de visibilité. La lecture et l'interprétation des données 3D et 2D des différentes couches seront facilitées par une ergonomie améliorée (Fig. 4). Un outil de recherche par mot clé et année est développé. Il vient interroger les données attributaires des couches ciblées, pour vous afficher les résultats de votre requête. Un système de curseur temporel permettra de "mixer" de "glisser" d'une année à l'autre.

## 12. Conclusion

L'archéologie clunisienne cherche à progresser vers une meilleure connaissance des conditions de l'implantation initiale de l'abbaye. La connaissance du site abbatial au X<sup>e</sup> siècle et l'émergence du *burgus* sont encore largement méconnues. La mise en commun des données issues de plusieurs disciplines permet d'améliorer les résultats de la recherche. Les travaux sur les méthodes et modèles numériques deviennent un outil de travail partagé et permettent d'évoluer vers une plateforme collaborative ouverte à tous les chercheurs.

Cette collaboration interdisciplinaire est devenue indispensable pour l'étude de systèmes spatio-temporels, regroupant des données géographiques, architecturales, hydrauliques, en tenant compte de leur évolution dans le temps. Elle nous permettra peut-être de mieux comprendre le contexte historique qui a guidé le choix d'implantation de l'abbaye de Cluny et ses liens avec le potentiel hydraulique du site.

La méthode mise en place pour l'étude d'une zone test autour du farinier de l'abbaye est un exemple qui pourrait être appliqué à de nombreux autres édifices. La méthodologie recherchée est relativement accessible et utilisable par tous.

Juliette Rollier, Zoé Petty, Alexandre Mazuir, Sébastien Faucher,  
Jean-François Coulais,  
Arts et Métiers ParisTech, Cluny

Gilles Rollier

Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap)  
UMR 5138, Archéologie et archéométrie, Université Lumière-Lyon2

## BIBLIOGRAPHIE

- Baud A. 2003, *Cluny, un grand chantier médiéval au cœur de l'Europe*, Paris, Picard.
- Baud A., Rollier G. 2010, *Liturgie et espace monastique à la lecture du Liber tramitis*, description monasterii et données archéologiques, in A. Baud (ed.), *Espace ecclésial et liturgie au Moyen Âge, Actes du colloque international (Nantua, Ain 2006); organisé par l'Action collective de recherche Morphogenèse de l'espace ecclésial au Moyen Âge*, Travaux, 53, Lyon, Maison de l'Orient et de la Méditerranée, 27-42.
- Bernard A., Bruel B. 1876-1903, *Recueil des chartes de l'abbaye de Cluny*, formé par A. Bernard, complété, révisé et publié par A. Bruel, Collection de documents inédits sur l'histoire de France, 6, Paris, 1876-1903.
- Boutoura C., Livieratos E. 2006, *Some fundamentals for the study of the geometry of early maps by comparative methods*, «e-Perimetron», 1, 60-70.
- Conant K.J. 1968, *Cluny, les églises et la maison du chef d'ordre*, Mâcon, Protat.
- De Luca L., Busarayyat C., Stefani C., Renaudin N., Veron P., Florenzano M., *An Iconography-based Modeling Approach for the Spatio-Temporal Analysis of Architectural Heritage*, in *Proceedings of IEEE International Conference on Shape Modeling International, Arts et Métiers ParisTech 2010*, Aix-en-Provence, France.

- Duby G. 1950, *La ville de Cluny au temps de saint Odilon*, in *Le gouvernement d'Hugues de Semur à Cluny, Actes du colloque scientifique international (Cluny 1949)*, Dijon, Société des Amis de Cluny, 260-261.
- Dumolin B. 1749-1774, *Description historique et topographique de la ville, abbaye et banlieue de Cluny*, Musée Ochier, ms. 71.
- Grosso E. 2010, *Integration of historical geographic data into current geo-referenced frameworks: A user-centered approach*, in *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Workshop on Digital Approaches in Cartographic Heritage (Vienna 2010)*, «e-Perimtron», 5, n. 3, 107-117.
- Laborier E., Nogues P. 2005, *Cluny, ancienne abbaye, rempart, courtine sud, de la Tour Butevaux au Farinier, Rapport de relevés d'élévations* (non publié).
- Maurice B. 1988, *Cluny III, la Maior Ecclesia*, Cluny, Musée Ochier.
- Mehu D. 1999, *Paix et communauté autour de l'abbaye de Cluny (X-XV<sup>e</sup> s.)*, thèse de doctorat, Université de Lyon 2.
- Mehu D. 2001, *Paix et communauté autour de l'abbaye de Cluny, X-XV<sup>e</sup> s.*, Lyon, Presses universitaires de Lyon.
- Riche D. 2000, *Un témoin de l'historiographie clunisienne à la fin du Moyen Age, le Chronicon de François de Rivo*, «Revue Mabillon», 11, 89-114.
- Rollier G. 1999, *Cluny, quartier rue des Tanneries, Rue Porte de Paris, Projets de construction d'une école de danse et d'un restaurant universitaire (Ensam)*, Rapport de diagnostic (non publié).
- Rollier G. 2009, *Implantation et hydraulique monastiques: le cas de Cluny*, thèse de doctorat, Université Lyon 2.
- Rollier G. 2012, *Les fortifications de Cluny*, in *Les fortifications urbaines en Bourgogne, Actes du colloque (Semur-en-Auxois 2011)*, Auxerre (en cours de publication).
- Rollier G., Roine N. 1993, *Document d'évaluation du patrimoine archéologique urbain, Centre national d'archéologie urbaine*, Tours, Paris, Association pour les fouilles archéologiques nationales (Documents d'évaluation du patrimoine archéologique des villes de France).

## ABSTRACT

The Cluny Abbey, the greatest building of European Christendom in the 12<sup>th</sup> century, has been transformed during its long history. The evolution of the place can be studied thanks to an abundant documentation, through archeological excavations and the study of landscape. The stratigraphic complexity of the successive buildings and the vastness of the territory in relation with its hydrographical system, convinced us to install a SIG database and research system. The Abbey is located at the confluence of two rivers, progressively converted by the monks, in order to obtain an extremely rational use of the water. The installation of a collaborative and interdisciplinary platform, called SIG 4D, dedicated to the history and archeology of the Cluniac landscape, requires the grouping of various types of data, that are often very diverse. The integration of 3D elements and their geolocalization in the geographic system bring technical difficulties which have to be solved. Starting with the documentary study and the excavations, we examine the questions linked to interdisciplinary use of various types of SIG and CAO data, and their dissemination amongst various researchers. Numeric tools offer new possibilities which encourage us to elaborate treatment procedures and data dissemination which are better adapted to the hybrid nature of archeological artifacts and to the study process of the historical traces in architecture and territory.

## IMMERSIA, AN OPEN IMMERSIVE INFRASTRUCTURE: DOING ARCHAEOLOGY IN VIRTUAL REALITY

### 1. Introduction to virtual reality

Virtual reality is often considered solely as a field of computer science in relation to interactive digital 3D worlds. It actually holds a special position in the usual scientific scheme by coupling humanities sciences with engineering. According to Fuchs *et al.* 2011, 6: «The purpose of virtual reality is to make possible a sensorimotor and cognitive activity for a person (or persons) in a digitally created artificial world, which can be imaginary, symbolic or a simulation of certain aspects of the real world». This proposition positions the man and its activity in the centre of virtual reality.

A technical and literal definition of virtual reality attempts to characterise the domain in one compact and sufficiently consensual sentence so that the practitioners of the domain can relate to it: «Virtual reality is a scientific and technical domain that uses computer science and behavioural interfaces to simulate in a virtual world the behaviour of 3D entities, which interact in real time with each other and with one or more users in pseudo-natural immersion via sensorimotor channels» (Fuchs *et al.* 2011, 7).

#### 1.1 *Virtual reality: historical overview*

Virtual reality is a relatively young domain. Ivan Sutherland is considered as a great precursor, through results published in his MIT PhD in 1963 (Sutherland 1963). He contributed shape editing and manipulation tasks with the SketchPad tool, which foreshadowed our current to industrial CAD tools. Shortly after, in 1965, Ivan Sutherland published *The Ultimate Display* (Sutherland 1965) where, in particular, he discussed the key elements related to immersion, interaction, capture of user activity and realism of 3D environments. This is to be considered and assessed in a context where the practical implementation of these concepts was impossible given the available technology.

Known as the “inventor” of the term *Virtual Reality*, Jaron Lanier founded in the 80s the company VPL Research, the first SME to industrialize software and hardware solutions for the production of virtual reality applications. In particular, among its solutions, this company integrated the first datagloves.

In any virtual reality application, the user is immersed and interacts with a virtual environment. Immersion is defined in Poupyrev *et al.* 1998 as a (per- ceptive, mental, emotional) state of a subject when one or several senses are isolated from outside and only stimulated with information from

In the field of immersive visualization, the early 90s was marked by the development of immersive visualization systems with very wide screens, as the CAVE™ in EVL (Electronic Visualization Laboratory: University of Illinois) (Drap *et al.* 2006), by Fanti and Cruz-Neira. This concept was then extended to less cumbersome concepts of workbench.

In 1990, Poupirev proposed to categorize the interaction into two major families (Poupyrev *et al.* 1998):

- Exocentric interactions: the user is in an external position in relation to the virtual environment so that the environment can be seen as a whole. Among these techniques, we find in a way World-in-Miniature (Stoakley *et al.* 1995), Metaphor resizing (Mine 1997), and the technique of Voodoo-Dolls (Pierce *et al.* 1999), all providing a means to manipulate objects by miniature representations;
- Egocentric Interactions: the user is inside the virtual world. Among these techniques, we find the technique of virtual hand and its many variants (Mine 1999) linear extension of the arm when the virtual user's hand is close to his body, then exponential expansion from a given distance (Bowman, Hodges 1997).

Haptic perception when interacting (tactile feedback: Massimino, Sheridan 1993 or force feedback: Sreng *et al.* 2009) is a very strong trend in the scientific community, and it contributes to multimodal visual, auditory and haptic feedback (Zhang *et al.* 2005).

Concerning local or distant collaborative interaction (Fleury *et al.* 2010), the problem is essentially to permit several users to interact simultaneously on the same environment. Collaborative work in Virtual Reality addresses the problem of the perception of other users and their activities (Fraser *et al.* 1999). Several models of synchronization and communication architectures (client/server, P2P) can ensure the coherence of perceptual interactions and the validity of the collaborative interaction (Duval, Fleury 2011).

## 1.2 *Virtual reality and archaeology*

Introduced by Reilly in 1990 (Reilly 1990), virtual archaeology was initially presented for excavation recording and virtual re-excavation using multimedia technologies. In a similar way, Krasniewicz (Krasniewicz 2000) proposed a 360° visualization infrastructure to help archaeologists in their research work. In this case, virtual archaeology was not used to restore knowledge, but to acquire new knowledge.

More recently, Pujol Tost (Pujol Tost, Sureda Jubrany 2007) contributed to the interaction, perception and simulation in VR for archaeology, and not only for the visualization of 3D models.

Le Cloirec (Le Cloirec 2009) focused on 3D models, and further extended their use in immersive structures as a perception tool to evaluate the functional or symbolical role of some architectural elements and spaces.

Vergnieux (Vergnieux 2011) considered the simulation for the movement and gesture validation, the physical coherency and the technical feasibility of constructions.

According to new trends in the domain, Forte (Forte 2011), one of the mainstays of virtual archaeology, suggests to replace the terminology related to a “reconstitution of the past”, by the expression “Cyber-Archaeology” relying on a “simulation of the past”.

Christou *et al.* (Christou *et al.* 2006) used an immersive CAVE-like structure combined with haptic devices and 3D sound for pedagogic purposes in a museum exhibition, but also as a tool for research. The Archave project (Vote *et al.* 2002) integrated also a CAVE-like structure and proposed tools for archaeologists to study historical sites. Another interesting work (Forte, Kurillo 2010) presents a tool where archaeologists collaborate remotely on shared virtual objects through realistic avatars reconstructed from 3D cameras. Their virtual reality framework proposed a rich toolkit of interaction features, including navigation, measurement, lighting and dragging. However, due to real-time 3D capture and rendering of users, the visualisation was restricted to small image resolution (320×240 pixels) to ensure fluid rendering (25 FPS).

All of these contributions were based on models of sites manually built in 3D modelling tools. Another trend, when dealing with existing buildings or sites, is to consider photomodelling tools. This technique allows to automatically build textured 3D models from sets of photos of a site or object. An interesting example is presented in Drap *et al.* 2006 with the provision of an immersive virtual reality interface for Shawback Castle. The immersive environment consists of a large stereoscopic projected wall, with infrared tracking. The work focuses on semantic annotations of blocks to ensure consistency with a knowledge database associated to the model.

In parallel, during the last decade, many contributions in the domain focussed on 3D restitution of past structures or environments visualization. In particular, there has been a great deal of effort to communicate archaeological and historical heritage to a large public through various media such as web (Pescarin *et al.* 2008), second life environments (Morgan 2009), or museum exhibitions (Bale 2011).

## 2. Going further

We believe that fields of virtual reality and archaeology may enjoy mutual benefits triggered by questions such as:

- 1) How can virtual reality, considered in its whole scope from science and technology to human sciences and natural sciences, benefit to archaeology?
- 2) What are the specific challenges brought by archaeology to virtual reality?

### *2.1 Virtual reality for archaeology*

Immersion, and particularly immersion in scale-one environments, should allow archaeologists to access to the evaluation of symbolical or cultural roles of architectural buildings. Moreover, archaeologists can be placed in situations to validate specific activities, ranging from displacements within environments to more complex interactions by using haptic devices to evaluate the physical feasibility or the coherency of a task. This aspect is strongly pertained to ergonomics and musculo-skeletal activity (Pontonnier *et al.* 2012). Fig. 1 illustrates an experiment performed in our virtual reality platform. In order to evaluate ergonomics, the user was immersed in a virtual environment mimicking the real environment. Motion capture, electromyographic (EMG) electrodes, force sensors and subjective questionnaires were used to evaluate sensory-motor aspects.

Collaborative virtual reality can be of a great help to build or modify shared 3D environments through the collaboration of multiple users. In such a context, we proposed the Collaviz open source software platform (Dupont 2010) dedicated to real-time remote collaboration for the design and visualization of scientific simulation-based applications. We connected two immersive infrastructures, Immersia and UCL VR platform, enabling two distant users to collaborate on the same digital world, a 3D model of the underground propagation of a seismic wave, using shared tools (Fleury *et al.* 2012) (Fig. 2).

It is worth noting that a lot of work is produced on integrating digital 3D models of large landscapes such as countries (<http://www.territoire3D.com/>) in virtual reality. In a similar way, reconstitutions of archaeological sites in their real geographical context are certainly a great challenge.

### *2.2 From archaeology to virtual reality*

Until now, virtual reality has been essentially focussed on industrial applications. In this context, the user interacts with recent, smooth and clean manufactured objects modelled by well-known CAD tools. In the context of archaeology, manipulated objects may be closer from nature, less steady, thus represented by more complex geometric models. The management of this new kind of data requires the study of new methodologies.

Since reconstitution of historical sites is an empirical activity, subject to assumptions, approximations and modifications, virtual reality should

Fig. 1 – A manipulation task in real (left), virtual (centre), virtual with haptic (right).

Fig. 2 – Collaborative work between Immersia and UCL VR platform.

of the digital universe. Realism and objective credibility of the rendering are diametrically opposed issues. Objective credibility is an intrinsic quality of the model depending of the archaeologist's perception. As an X-ray picture has a functional credibility for a medical practitioner, virtual archaeological models and universes must be designed to ensure this credibility. This will lead to the development of generic methods that should push the boundaries of virtual reality.

Scale-one immersion is a key characteristic proposed by virtual reality to archaeology; it is also a real issue in virtual reality while dealing with the concept of immersion within an environment at human size.

### 3. Immersive virtual reality in Immersia

We present the immersive platform Immersia, its role in the European project Visionair, and two projects related to archaeology that illustrate the possibilities of such an environment.

#### 3.1 *Immersia platform*

The immersive platform of the Irisa/Inria computer science laboratory is a large virtual-reality room dedicated to real-time, multimodal (vision, sound, haptic, BCI) and immersive interaction. It hosts experiments using interactive and collaborative virtual-reality applications that have multiple local or remote users.

Images are rendered on four glass screens: a front one, two sides and a ground. Dimensions are 9.6 m wide, 2.9 m deep and 3.1 m high. Over 15 millions pixels are displayed. The visual reproduction system combines thirteen HD projectors. A tracking system, composed of 16 infrared cameras, enables real objects to be tracked within the scene. Images are recomputed as the user moves to fit his point of view, together with high-resolution rendering, active stereoscopy and homogeneous colouring, thereby delivering a visually realistic experience. Spatial sound is rendered by speakers with 10.2 format or by headsets with virtual 5.1, controlled by the user's position.

#### 3.2 *Visionair project*

Immersia is a key node of the FP7 European Project Visionair (Kopecki *et al.* 2011) which goal is to create a European infrastructure that should be a unique, visible and attractive entry towards high-level visualisation facilities for Virtual Reality, Scientific Visualisation, Ultra High Definition, Augmented Reality and Virtual Services. These facilities, distributed across about twenty countries in Europe, are open and easily accessible to a wide set of research communities. Both physical access and virtual services are provided by the infrastructure. Full access to visualization-dedicated software is offered through call for projects, while physical access to high level platforms will be partially accessible to other scientists, free of charge, based on the excellence of the project submitted.

#### 3.3 *Archaeology research projects in Immersia*

Two projects started in Immersia, in collaboration with two different archaeology research laboratories. The first one, with the Creaah, a laboratory of archaeology, archeoscience and history, relies on immersive reconstitutions of several paleolithic existing buildings. Associated with interactive tools, the project enables archaeologists to extract new knowledge *ex situ*. The second one, with the French preventive archaeology research institute Inrap,

Fig. 3 – Immersive work in the virtual chamber of Carn.

Fig. 4 – Exploring the Bais Gallo-Roman *villa*.

focuses on the immersive reconstitution of a Gallo-Roman ruined site, the Bais domain.

### 3.3.1 The Carn monument

This project has three main objectives: (i) propose a common workflow to reconstruct archaeological sites as 3D models in fully immersive systems, (ii) provide archaeologists with tools and interaction metaphors to exploit immersive reconstitutions, and (iii) develop the use and access of immersive systems to archaeologists.

In a first contribution (Gagne *et al.* 2012), we proposed a procedure to model the central chamber of the Carn monument, and compare several softwares to deploy it in an immersive structure (Fig. 3). We then proposed two immersive implementations of the central chamber, with simple interaction tools, and evaluated them with the help of archaeologists. The results obtained in this work validated the possibility and relevance of working in an immersive virtual reality structure.

### 3.3.2 The Gallo-Roman Bais site

Following a different approach, we started from a 3D model proposed by an archeologist of Inrap based on the excavation of a Gallo-Roman *villa* in Bais, France (Le Cloirec 2011). We then built an immersive application from this model, focusing on the navigation inside the site (Fig. 4).

The goals of this work, still under progress, are (i) to validate at scale-one different assumptions made by the archaeologists during the modelling step, (ii) to study the possible human displacements in the site, (iii) to better understand the life of the people with the immersive perception of the place.

Virtual reality provides in this case tools for argumentation, reasoning and understanding to the archaeologists, by placing them at the centre of the simulation.

## 4. Conclusion

This paper focussed on cross-domain mutual enrichment between archaeology and virtual reality. On the one hand, virtual reality could be a real improvement for archaeological field by ensuring the ability to propose collaborative modelling and analysis of archaeological objects in their real geographical context. On the second hand, the application field of archaeology could provide complex models that will lead to propose new generic methods for complexity management and interaction in an immersive context for large environments.

Ronan Gagne  
Université de Rennes 1

Valérie Gouranton, Bruno Arnaldi  
Institut National des Sciences Appliquées de Rennes

Georges Dumont  
École Normale Supérieure de Rennes

Alain Chauffaut  
Institut National de Recherche en Informatique et Automatique de Rennes

## BIBLIOGRAPHIE

- Bale K., Abbott D., Gowigati R., Pritchard D., Chapman P. 2011, *Linking Evidence with Heritage Visualization using a large Scale Collaborative Interface*, in M. Dellepiane, F. Niccolucci, S. Pena Serna, H. Rushmeier, L. Van Gool (eds.), *VAST11 International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage*, Aire-la-Ville, Eurographics Association, 121-128.
- Bowman D.A., Hodges L.F. 1997, *An Evaluation of Techniques for Grabbing and Manipulating Remote Objects in Immersive Virtual Environments*, in *SI3D97 Symposium on Interactive 3D Graphics*, New York, ACM Press, 35-38.

- Christou C., Angus C., Loscos C., Dettori A., Roussou M. 2006, *A versatile large-scale multimodal vr system for cultural heritage visualization*, in *VRST06 Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, New York, ACM, 133-14.
- Cruz-Neira C., Sandin D.J., De Fanti T.A., Kenyon R.V., Hart J.C. 1992, *The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment*, «Communications of the ACM», vol. 35, issue 6, 64-72.
- Drap P., Durand A., Nedir M., Seinturier J., Papini O., Boucault F., Chapman P., Viant W., Vannini G., Nucciotti M. 2006, *Towards a Photogrammetry and Virtual Reality Based Heritage Information System: A Case Study of Shawbak Castle*, in *VAST 2006, International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, Aire-la-Ville, Eurographics Association, 67-74.
- Dupont F., Duval T., Fleury C., Forest J., Gouranton V., Lando P., Laurent T., Lavoue G., Schmutz A. 2010, *Collaborative Scientific Visualization: The COLLAVIZ Framework*, in S. Coquillart, V. Interrante, T. Kuhlen (eds.), *JVRC 2010 Joint Virtual Reality Conference of EuroVR - EGVE - VEC*, Aire-la-Ville, Eurographics Association.
- Duval T., Fleury C. 2011, *PAC-C3D: A New Software Architectural Model for Designing 3D Collaborative Virtual Environments*, in *Proceedings of ICAT 2011 International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 28-30.
- Fleury C., Chauffaut A., Duval T., Gouranton V., Arnaldi B. 2010, *A Generic Model for Embedding Users' Physical Workspaces into Multi-Scale Collaborative Virtual Environments*, in *ICAT 2010 International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, Tokyo, The Virtual Reality Society of Japan, 1-8.
- Fleury C., Duval T., Gouranton V., Steed A. 2012, *Evaluation of Remote Collaborative Manipulation for Scientific Data Analysis*, in *VRST 2012 - Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, New York, ACM.
- Forte M., 2011, *Cyber-Archaeology: Notes on the simulation of the past*, «Virtual Archaeology Review», Vol. 2, 4, 7-18.
- Forte M., Kurillo G. 2010, *Cyberarchaeology: Experimenting with teleimmersive archaeology*, in *Virtual Systems and Multimedia*, Conference Paper Presented at the Sixteenth International Conference on Virtual Systems and Multimedia (USMM 2010), October 20-23, Seoul.
- Fraser M., Benford S., Hindmarsh J., Heath C. 1999, *Supporting Awareness and Interaction through Collaborative Virtual Interfaces*, in *UIST '99 Symposium on User Interface Software and Technology*, New York, ACM Press, 27-36.
- Fuchs P., Moreau G., Guitton P. 2011, *Virtual Reality: Concepts and Technologies*, Boca Raton, CRC Press.
- Gagne R., Barreau J.B., Gouranton V., Cousseau F. 2012, *Large-scale immersive reconstitution of a Neolithic corbel dome*, in *VAST 2012 International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, Brighton, Eurographics Association, 65-72.
- Kopeccki A., Wössner U., Mavrikios D., Rentzos L., Weidig C., Roucoules L., Ntofon O., Reed M., Dumont G., Bündgens D., Milecki A., Baranyi P., Noel F., Masclat C., Attene M., Giannini F., Spagnuolo M. 2011, *VISIONAIR: VISION Advanced Infrastructure for Research*, «SBC Journal on 3D Interactive Systems», 2, 40-43.
- Krasniewicz L. 2000, *Immersive imaging technologies for archeological research*, in J.A. Barceló, M. Forte, D.M. Sanders, L. Krasniewicz, *Virtual Reality in Archaeology*, BAR Internationale Series, 843, Archaeopress, Oxford, 163-171.
- Le Cloirec G. 2009, *Les atouts de l'imagerie 3D pour l'archéologie de terrain*, in R. Vergniew, C. Teuore, *Proceedings of Virtual Retrospect*, Bordeaux, Editions Ansonius, 29-36.
- Le Cloirec G. 2011, *Bais, Le bourg St. Père, proposition de restitution des volumes*, dans D. Pouille, *La villa gallo-romaine du bourg St Père à Bais (35)*, DFS de fouille archéologique préventive, Inédit, Rennes, Inrap.
- Massimino M.J., Sheridan T.B. 1993, *Sensory Substitution for Force Feedback in Teleoperation*, in *Presence*, vol. 2, n. 4, 344-352.
- Mine M.R. 1995, *Virtual Environment Interaction Techniques*, Technical Report n. TR95-018, University of North Carolina, Dept. of Computer Science.
- Mine M.R., Brooks Jr. F.P., Sequin C.H. 1997, *Moving Objects in Space: Exploiting Pro-prioception in Virtual Environment Interaction*, in *SIGGRAPH '97 Proceedings of the 24<sup>th</sup> annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co, New York, vol. 31, 19-26.

- Morgan C.L., 2009, *(Re)Building Catalhöyük: Changing Virtual Reality in Archaeology*, «Archaeologies, Journal of the World Archaeological Congress», 5(3), 468-487.
- Pescarin S., Calori L., Camporesi C., Ioia M.D., Forte M., Galeazzi F., Imboden S., Moro A., Palombini A., Vassallo V., Vico L. 2008, *Back to 2<sup>nd</sup> AD AVR on-line experience with Virtual Rome Project*, in *VAST International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, Aire-la-Ville, Eurographics Association, 109-113.
- Pierce J.S., Stearns B.C., Pausch R. 1999, *Voodoo dolls: seamless interaction at multiple scales in virtual environments*, in *13D99 Symposium on Interactive 3D graphics*, New York, ACM Press, 141-145.
- Pimentel K., Teixeira K. 1994, *Virtual Reality: Through the New Looking Glass*, Blue Ridge Summit, Windcrest/McGraw-Hill.
- Pontonnier C., Dumont G., Samani A., Madeleine P., Badawi M. 2012, *Designing and Evaluating a Workstation in Real and Virtual environment: from Digital Mock-up to Realization*, in *IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom*, in press.
- Poupyrev I., Weghorst S., Billinghamurst M., Ichikawa T. 1998, *Egocentric Object Manipulation in Virtual Environments: Empirical Evaluation of Interaction Technique*, *Computer Graphics Forum*, 17(3).
- Pujol Tost L., Sureda Jubrany M. 2007, *Vers une Réalité Virtuelle véritablement interactive*, in *Proceedings of Virtual Retrospect*, 77-81.
- Reilly P., 1990, *Towards a virtual archaeology*, in *Computer Applications in Archaeology*, BAR International Series 565, 133-139.
- Sreng J., Lécuyer A., Andriot C., Arnaldi B. 2009, *Spatialized Haptic Rendering: Providing Impact Position Information in 6DOF Haptic Simulations Using Vibrations*, in *IEEE-Virtual Reality International Conference*, IEEE, Washington, 3-9.
- Stoakley R., Conway M.J., Pausch R. 1995, *Virtual Reality on a WIM: Interactive Worlds in Miniature*, in *CHI '95 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 265-272.
- Sutherland I. 1963, *Sketchpad, A Man-Machine Graphical Communication System* Garland Publishing, New York, MIT Press.
- Sutherland I. 1965, *The Ultimate Display*, in *Proceedings of IFIP Congress*, vol. 2, New York, USA, Spartan books, 506-508.
- Vergnieux R. 2011, *Archaeological research and 3D models (Restitution, validation and simulation)*, «Virtual Archaeology Review», 2, n. 4, 39-43.
- Vote E., Acevedo D., Laidlaw D., Joukowsky M. 2002, *Discovering petra: Archaeological analysis in vr*, in *IEEE Computer Graphics and Applications*, IEEE, Washington, 38-49.
- Zhang Y., Sotudeh R., Fernando T. 2005, *The Use of Visual and Auditory Feedback for Assembly Task Performance in a Virtual Environment*, in *SCCG '05 Conference on Computer Graphics*, New York, ACM Press, 59-66.

## ABSTRACT

This paper contributes to the cross-domain mutual enrichment between archaeology and virtual reality. We are presenting here Immersia, an open high-end platform dedicated to research on immersive virtual reality and its usages. Immersia is part of the European project Visionair that offers an infrastructure for high level visualisation facilities open to research communities across Europe. In Immersia, two projects are currently active on archaeological themes. One is relative to the study of the Cairn of Carn, with the Creaah, a multidisciplinary research laboratory of archeology and archeosciences, and the other concerns the reconstitution of the Gallo-Roman *villa* of Bais, with the French institute Inrap.

## SIG DES MERVEILLES: ANALYSING ROCK ART DISTRIBUTION WITH A WEB CARTOGRAPHIC PLATFORM

### 1. Introduction

Cartographic analysis tools such as Geographic Information Systems (GIS), whether they are desktop applications or web platforms, are used to improve the knowledge about a geographic area. This kind of tools enables a very accurate analysis and complete display of spatial objects and layers. In the past few years, GIS became more and more popular in sciences such as archaeology or geology. For instance, in archaeology, spatial analysis allows discovering meaning in spatial distribution of static archaeological objects: this use of topographic and archaeological data was studied on engraved rocks in the *Vallée des Merveilles* (French name for Valley of Marvels) and led to the development of a specific GIS.

Since archaeologists started studying this area, they have been trying to understand how the engraved rocks were distributed in space and if rules could be extracted between engraving types and rocks location. Spatial analysis can be applied to study distribution of carved rocks, so that it could find new meaning.

But using GIS generally requires knowledge in computer science and training for specific software, which may be too generic for a specific research. We developed a GIS that is specific to the needs of archaeologists in studying rock art in the Valley of Marvels. This system provides basic tools for spatial analysis that fulfil specified needs, and do not ask for a long training course. The methodology for surveying, modelling and developing the GIS is illustrated in this paper.

We first introduce the context and the studied valley. Then, data acquisition is explained in Section 3 with both archaeological and topographic survey. In Section 4, the data model and its integration for web-use are presented. Developed tools are described in Section 5, and Section 6 gives an overall view of the web application. Finally, we conclude the paper and give an overview of the future work.

### 2. Context: the Valley of Marvels and Mount Bego

The archaeological site of Mount Bego (Tende, Alpes-Maritimes) is located between 2000 and 2900 m high, in the valleys which are part of one sector of the Mercantour National Park. The current landscape of the region of mount Bego is the result of the protrusion of the quaternary glaciers and

most of the shapes of mountain relief are due to the glacial morphology: today's valleys are ancient glacial valleys, in a U shape, with steep flanks and a more or less flat bottom. When they melted, the glaciers left glacial rock bars and frontal moraines which retain plenty of stepped lakes: that is why the region is so rich of water. Glacier's action on the rocks of the site – schist and sandstone of colour purple, orange, red and green – gave birth to very tender and smooth surfaces which were consequently very easy to carve for prehistoric men.

Field researches have been led for more than forty years: we refer here to the current field works of Henry de Lumley's team, in charge of research on the site since 1967. The first attempt at a complete tracing of all the carved rocks of the site was managed at the beginning of the last century by Clarence Bicknell (Bicknell 1972); his work was resumed by Carlo Conti (Conti 1972), of whom H. de Lumley is the scientific successor.

These studies permitted to list 4111 engraved rocks, on which have been inscribed, at prehistoric period, more than 35000 signs made using the technique of pecking. All these pecked engravings have been inventoried and geolocated in the GIS. However carving activities lasted until 1989, when the site was classified as historical monument, with direct consequence the ban on carving on the rocks: pecked protohistoric engravings coexist with great panoply of patterns and inscriptions made by shepherds, soldiers and visitors who came in the valley from Roman period until nowadays.

Carved rocks of mount Bego region are scattered over 1400 ha, subdivided in seven main sectors, in which the most remarkable are the Marvels and Fontanalba because of the great number of carvings they contains. This subdivision in zones and groups was made between 1927 and 1942 by Carlo Conti in charge of listing systematically all engraved rocks of the region, by Piero Barocelli Superintendent of Antiquities of Liguria, Piemonte and Val d'Aosta. Professor Henry de Lumley kept this subdivision in 1967, when he resumed the inventory campaigns.

Engraved signs that were found on mount Bego rocks are not very varied and can be classified in five well distinct categories: horned figures, ploughed bulls, weapons, geometric figures and anthropomorphs. Horned figures are the main engraved signs from far: with about 12000 figurations, in mount Bego region, nearly one pattern out of three is a horned figure.

However it is the weapon category – dagger, halberd and axe – which has a fundamental role in the dating of the prehistoric period of the engravings. To obtain a relative dating for rupestrian carving, we proceed in a typological comparison between weapons figurations and real weapons found in an archaeological context, during digs in the nearby area and in farther regions. This comparison is based on the matching in morphological characters of the two weapons to be confronted, carved and real. These characters are

mainly constituted by the form and length of the blade, its base and edges morphology, and the shape of the pommel and handle concerning daggers; by the form and length of the blade, its base and edges morphology, and the fitting type concerning halberds; and by the fitting type and the cutting edge of the blade for axes.

This approach allows situating engraving realisation of mount Bego between the beginning of Copper age or Final Neolithic in French (from about 3400 years B.C.) and Early Bronze age I (until about 1800 B.C.).

Actually, the most represented daggers seem to be local Final Neolithic ones. The carved daggers can be compared to knapping stone or metal types: stone daggers usually have convex blade edges; on the contrary, copper blades from Chalcolithic 1 and 2 are triangular, often with an axial rib; lastly, daggers from Bell-Beaker culture (Chalcolithic 3) have a triangular blade, trapezoidal at the base. This chronological sequence is also confirmed by halberds. Figures of pecked daggers and halberds dating from the Early Bronze age could exist. The typical dagger blade from Early Bronze age (from 1900 B.C.) has an elongated and rounded base and, as a new character, a hilt. On rock carvings, in some cases, we have revealed the desire to underline the presence of the hilt, by making it protruding; we can find the same desire on the representation of halberds. The dating of pecked weapons seems to cease at Early Bronze age: spatula axes, lances and swords are totally absent.

Compared to the chronological scale given by the study of engraved weapons, archaeological excavations conducted in shelters revealed a pre-historic frequentation of the site wider and much older than Final Neolithic. Indeed, revision of archaeological material found (Binder, Lepère, Huet 2009; Bianchi, Huet, Sandrone 2011) allowed to attest a human presence on the site from the Early Neolithic (5400 B.C.), period represented by few shards of pottery attributed to the Cardial culture; Middle Neolithic and the *Chasséenne* culture are also recognisable due to the presence of shards of pottery and flint. Even today it is still difficult to say exactly if some engravings could date from these older phases and this is due to the absence of dating elements (such as weapons), and a very weak presence of superimpositions between carved figures (when they exist, superimpositions give a true stratigraphy of patterns, as it is known in the rupestrian site of Valcamonica - BS).

### 3. Data acquisition

The data that are integrated into the GIS are divided into two types, which are currently gathered in two specific databases: the archaeological data and the topographic data. Each type of data has its own kind of recording, but both are done simultaneously during the summer survey period.

### 3.1 *Archaeological data*

Because of the snow, high valleys around the mount Bego are reachable only during summer. Carving study should imperatively start with a methodical exploration of the zone, to locate each prehistoric carved rock. This prospecting is done by archaeologists with the help of trainee students who participate in the site for one month at least. Every wall, slab, isolated rock is observed at different times of the day to benefit from a varied solar lighting (with the help of metallic light reflectors). This allows highlighting new engravings on rocks already examined and/or checking the detail of carvings with studies under way.

Carved rocks are then traced full size, transferred from rock to cellophane paper, with the help of a felt pen with a slender point. At the same time, a scheme of each rock is done a scale of 1/10<sup>th</sup> on graph paper. The outline and details of the rock (uncouplings, cracks, natural holes, glacial streaks, gutters and desquamated parts) are reported. Each engraving is drawn and receives an ID number.

The numbering used is based on previous Carlo Conti's work: as far as it was possible, the classification system elaborated by Conti was respected, each figure defined by numbers, zone (Z), group (G), rock (R) and its ID number (e.g., the anthropomorph, on the *Chef de Tribu* (Tribe Chief) stele is coded by: zone VII, group I, rock 8, number 1 or ZVII.GI.R8, n°1). All rocks previously numbered by Carlo Conti conserved their numbers; new rocks have been numbered considering their proximity with other located rocks, and their numbers are followed by a Greek letter (e.g., ZI.GI.RIα). Digital pictures of the whole rock and each carving are also taken.

Finally, a form is filled for each engraving. It is used, on the one hand to describe the technique of realisation of the observed figure and to assign it a style, and on the other hand to note the characteristics of the rock on which it lays: coordinates, dimensions, nature, colour, dip (inclination) orientation, state of conservation, number of carvings.

At the laboratory, all the documents gathered on the field (tracings on cellophane, scheme plans at 1/10<sup>th</sup> scale, forms of carvings and pictures) pass through a reclassification to allow their exploitation.

The tracing on cellophane and the scheme plans at 1/10<sup>th</sup> scale on graph paper are digitized and assembled during a computer graphics process aiming to harmonize their scale. This process gives the opportunity to have a most reliable reconstitution plan of the rocks and its engravings at the 1/5<sup>th</sup> scale and to have an individual plan of each carving at full size. All of these graphic documents and the pictures taken during the summer study campaign, supply the bank of images of the computer database "Matériel paléontologique et préhistorique: gravures rupestres de la région du mont Bego".

Fig. 1 - Base station receiver at the Lac Long Supérieur, mobile receiver in the valley.

The archaeological database is finally used to enter information concerning the carved rocks, its different faces and each carving: a computer form of individual data exists for each listed engraved rock, each of its faces and each traced carving.

### 3.2 Topographic data

The French IGN (*Institut national de l'information géographique et forestière*) and its engineering school ENSG (*Ecole Nationale des Sciences Géographiques*) take part in the topographic survey with professional land surveyors and students. As many rocks have to be recorded in this wide area, we chose to use the RTK technique for practical problems.

First of all, a benchmark was placed in the surveyed zone and its coordinates were measured: this reference point was chosen so that the visibility in the surveyed area is the best. Each day, this station monitors the point coordinates during the whole time of survey. Then, mobile GPS receivers are used on the field to record the rocks coordinates. The RTK mode allows making just a few seconds measurement for each point, with the radio communication between the two receivers. As the coordinates are measured at rock's scale, a 5 cm precision is accurate enough. Fig. 1 shows the type of receptors that are used on the field for base station and mobile receivers.

Finally, the data are processed at the IGN: the errors are calculated with the permanent station data (difference between measure and real coordinates) and are used to correct the mobile receiver's measurements (Fig. 1).

## 4. Data integration

The archaeological database contains the descriptions of the engravings, the rocks and their context. These data are captured from the field files, which archaeologists fill when a new engraving is found. Pictures and vector files of the carvings are stored on a server. A web administration page for the database management has been developed by the researchers.

In order to manage the GPS data that are processed by the IGN, a relational database has been developed based on the OGC standards for geographic information storage, with the Simple feature access (OGC 2012). This database is currently distinct from the archaeological database for a structural question: the first database does not use a relational model. The geographical database was developed with PostgreSQL (PostgreSQL 2012) and PostGIS (PostGIS 2012) extension. Four types of objects are used in this database, based on the archaeological data structure: zones, groups, rocks and figures (carvings). A carving has a unique identifier in the archaeological database, which can be found in the relational structure: number of zone – number of group – name of rock – number of figure.

With the GIS, only the zones and the rocks can be mapped and visualized. The geometries of the zones (polygons) have been vectorized with the help of topographic maps and the known limits of zones. The rocks geometries (points) are the result of GPS surveying. The groups cannot be mapped because of the fuzzy limits that define them and that are evolving each year. Finally, the carving cannot be mapped because of the mode of GPS surveying, which is at rock scale.

In order to encode the figure description for storage, both databases use a glossary: the general type of engraving is encoded by the first letter of a character string. Then, other characters stand for an accurate description of it, using a hierarchical code. Table 1 gives an example of code for daggers.

Engraving description (French name)	Code
Dagger ( <i>Poignard</i> )	P
Dagger with long blade, concave edges, round end	Pbt2
Dagger with short triangular blade, straight edges, sharp end	Par1
Dagger with short triangular blade, straight edges, sharp end, straight base; short and narrow hilt; rounded pommel; 2 rivets	Par1r2ca2gX2

Tab. 1 – Example of encoding from the glossary (Laboratoire Départemental de Préhistoire du Lazaret).

## 5. Developed tools

### 5.1 *Navigation and filtering*

The Valley of Marvels comprises more than 4000 engraved rocks: visualizing all of these data at the same time could prevent understanding

the distribution of engravings. The first tools were developed according to Shneiderman's mantra for information seeking: «Overview first, zoom and filter, then details-on-demand» (Shneiderman 1996). Filters were developed to reduce the amount of displayed data by specifying the type of engraving and the zone of interest.

Overview (a general view of the zone and situation of current view) and zooms are the basic controls for web-mapping platforms. History of zooms and map's movements is stored, so that the user can go back and forward in map navigation.

Two filters are available; both can be combined to be more accurate: a text field is used to specify the code of carvings to look for, and the zone number can be selected from a list. In order to query a specific type of engraving, or a general code, the "\*" symbol can be used to mean "any character string". For instance, searching all the daggers locations is encoded by a "p\*" query (*poignard* in French). The request can be more specific with a longer character string.

Using a single filter, all the rocks for a given engraving type, or in a given zone, can be requested. Using both filters, we can achieve such queries as "All daggers with a large handle and in zone VII".

Exporting the displayed rocks is enabled with the use of KML format: KML is the Google language for geographic features, which can be used within any web-, desktop GIS, smartphones or tablets. This allows saving the features in a local file, which can be read with Google Earth; a 3D view of the area is provided with this software. This export does not keep a real connection to the database, but store all the metadata of rocks in the local KML file: this way, the created file can be read by any computer.

## 5.2 Spatial analysis

Before using this information system, there was not any real geographical knowledge of the spatial distribution of engraved rocks in the valley. That is why such a tool was required to understand the distribution of rocks and carvings. The first objective of this web platform was to manage on-the-fly spatial analysis with easy tools and effective results.

We chose to develop functionalities to analyse the amount of objects among the Valley of Marvels. The objects that could be studied were both the rocks and the figures. Therefore the scale of the analysis could be both the zones and the rocks – the groups are not represented, so they cannot be taken into account. Finally, three kinds of spatial analysis can be highlighted in this study: (1) amount of figure per rock, (2) amount of figure per zone and (3) amount of rock per zone. As an optional criterion for these analyses, the type of figure can be used the same way we described in the above section, with a code field in the form.

The result of this type of analysis is a map of quantitative data (amount of rocks/engravings): according to the visual variables of Bertin (Bertin 1967), the cartographic representation uses proportional circles standing for the amount of objects.

Fig. 2 presents the three main control panels for displaying, filtering and analysing the data. The *Navigation* tab contains the different information layers, display options and export tools. The *Filtre* tab is the form for filtering the displayed rocks. Finally, the *Carto* tab is the spatial analysis form for rocks and engravings study (Fig. 2).

## 6. Web application

A specific geographic server is used for disseminating these specific data: MapServer (MapServer 2012) was chosen in order to create dynamic Web Feature Services (WFS), which would be specific to user's request. This request needs to join different tables from the database, according to what has to be analysed. A temporary table (SQL view) would result from this request, and MapScript language allows creating a temporary WFS pointing to this table. It is finally displayed on the client interface.

On the client side, the GIS was developed with the use of open source web libraries for interactive web applications (ExtJS) and web-mapping (OpenLayers, GeoExt). The French Géoportail API of IGN (IGN 2012) was used for the base maps, including topographic maps and orthophotos of the area.

Fig. 3 describes the architecture of the web GIS and the web services for data querying. Only the geographic database is used by the GIS, gathering geometries of zones and rocks, coordinates and basic information about rocks and engravings. In the near future, both archaeological and geographic database should be merged to have the most accurate description of the objects in the GIS (Fig. 3). The figure highlights the exchanges of data between the web client (web browser using the GIS) and the Lazaret server (containing the data and the cartographic server). Client displays the platform, requests are encoded into SQL to create a view, and WFS feeds the cartographic portal.

The proportional circles used in the spatial analysis representation require on-the-fly legend: this one is created on the client side, with a Canvas object (graphic web library). This legend object contains three circles: minimum, maximum and mean values, which are sent by the database.

The final system is installed on an Intranet server so that it is available only to personnel of the Lazaret laboratory. Indeed, the data are confidential so that hikers cannot access the protected engravings. Fig. 4 presents two types of visualizations: description of filtered rocks (only Zone VII) with pie chart (carving types) and table (carving descriptions), and the result of a

Fig. 2 – Control panels: layers, filter and spatial analysis tools.

Fig. 3 – Architecture of the web services and GIS.

Fig. 4 – Two views of the GIS of Marvels: description of a rock and spatial analysis.

spatial distribution analysis on the whole area (amount of general carvings per rock).

## 7. Conclusion and future work

This web cartographic platform called *SIG des Merveilles* (GIS of Marvels) is the first cartographic engine that was used in the Lazaret laboratory to study the whole Valley of Marvels. The tests led with archaeologists of the Lazaret laboratory were successful: the geographic information system is simple to use and provides quick and clear results.

New tools would be developed for more accurate analysis: complex filters on other types of attributes (with AND operators) and filters composition. This would allow better analysis for specific areas or objects. Studying the environment of the rocks based of topographic description (e.g., summits, lakes, slope, etc.) could also bring more information about the rocks and engravings distribution.

Moreover, a mobile version of this GIS could be considered: a smartphone or a tablet could be used on the field to find rocks and engravings, with the user's situation on the map. This could be a mean to make rocks search easier.

Finally, we intend to include new data from other area around the *Vallée des Merveilles*: Fontanalba, Gordolasque, etc. The same data acquisition and integration process can now be applied to these other areas of the Mercantour national Park in the next few years.

Gabriel Vatin  
MINES ParisTech - CRC

Nicoletta Bianchi  
Laboratoire Départemental de Préhistoire du Lazaret

### *Acknowledgments*

We would like to express our gratitude to Prof. Henry de Lumley, director of the French Institute of Human Paleontology, for letting us study the Valley of Marvels area and funding this work. We thank ENSG teachers of DIAS and DPTS who supported this work and still do, especially Laure Chandelier and Philippe Nicolon. We would also like to give special thanks to all of the volunteers without whom this work would not have been possible.

### BIBLIOGRAPHIE

- Bertin J. 1967, *Sémiologie graphique*, Paris, Mouton/Gauthier-Villars.  
Bianchi N., Huet T., Sandrone S. 2011, *Inventaire du matériel archéologique du gias du Ciari (Tende, Alpes-Maritimes, France)*, Soprintendenza per i Beni Archeologici del Piemonte e del Museo delle Antichità Egizie, Museo Civico di Cuneo.

- Bicknell C. 1972, *Guide des gravures rupestres préhistoriques dans les Alpes-Maritimes, traduction française de l'édition originale anglaise de 1913*, Bordighera, Institut International d'Etudes Ligures.
- Binder D., Lepère C., Huet T. 2009, *Compte rendu de mission au Musée des Merveilles – Tende*, in Binder D. (ed.), *ETICALP, Matières premières, productions et usages du Paléolithique supérieur à l'âge du Bronze ancien*, PCR 2009-2011, Rapport 2009.
- Conti C. 1972, *Corpus delle incisioni rupestri di Monte Bego, fascicolo I. Zona I. Regione dei Laghi Lunghi*, Bordighera, Istituto Internazionale di Studi Liguri.
- IGN 2012, *API Géoportail* (<http://api.ign.fr/accueil>).
- MapServer 2012, *MapServer 6.0.3 documentation* (<http://mapserver.org/>).
- OGC 2012, *OGC® Standards and Supporting Documents* (<http://www.opengeospatial.org/standards>).
- PostGIS 2012, *PostGIS: Home* (<http://postgis.refractor.net/>).
- PostgreSQL 2012, *PostgreSQL: The world's most advanced open source database* (<http://www.postgresql.org/>).
- Shneiderman B. 1996, *The Eyes Have It: A Task by Data Type Taxonomy for Information Visualizations*, in *Visual Languages, Proceedings, IEEE Symposium 1996*, Boulder, IEE Computer Society, 336-343.

## ABSTRACT

The Vallée des Merveilles (Valley of Marvels), in the Mercantour National Park (France), is a major place for studying the late Neolithic Age until the beginning of the Bronze Age: since the early 20<sup>th</sup> century, more than 4000 engraved rocks have been listed, representing 40,000 carvings. The Laboratoire Départemental du Lazaret has been studying these engravings for more than forty years: a large database describes the whole rocks and figures and is still filled with new findings. But such a large amount of data from a vast archaeological site needs efficient tools for its study, such as mapping the location of the rocks. Many improvements regarding the study of the carvings and their spatial distribution were made possible by the development of a web GIS: consulting the data is made easier and clearer with a web-mapping platform and specific tools. Filtering for choosing the data to display and automatically generated maps allow an overall view of the spatial distribution of the Marvels' engravings. Using both the IGN's Geoportal data and cartographic web libraries produced an efficient and complete web service for consulting and analyzing the engraved rocks of the Valley of Marvels. This one can be used for any area in the Mercantour Park, as long as new data are added to the databases.

## MÉTHODOLOGIES ET APPORTS DU PROJET ALPAGE POUR L'ESPACE PARISIEN MÉDIÉVAL: L'EXEMPLE DU GÉOCODAGE DES CONTRIBUABLES VERS 1300

À l'origine de ce projet géohistorique, il y avait un pari: considérer que la donnée parcellaire ancienne pouvait être le noyau référentiel de toute étude historique parisienne à dimension spatiale. Pour ce faire, archéologues, historiens, géomaticiens et informaticiens se sont associés dans le projet ALPAGE<sup>1</sup>, soit au total une vingtaine de chercheurs appartenant à plusieurs laboratoires<sup>2</sup>. Ils ont construit ensemble un Système d'Information Géographique (SIG) historique comprenant les données et les applications nécessaires pour interroger la dimension spatiale des phénomènes historiques concernant la ville de Paris pour les périodes pré-industrielles.

Nous présenterons tout d'abord le fonctionnement global du projet, qu'il s'agisse des enjeux, des outils et des méthodes de travail mis en œuvre durant presque 4 années. Puis nous donnerons un exemple de cette collaboration interdisciplinaire à propos du géocodage des foyers fiscaux connus en 1300, ce qui permet de travailler sur la répartition des fortunes et des densités de population dans le Paris de la fin du Moyen Âge.

### 1. Objectifs et économie générale du projet ALPAGE

#### 1.1 *Enjeux du projet*

Si la reconstitution papier du plus ancien parcellaire de Paris avait échoué dans les années 1980 (Darin 1998, 66-67), la diffusion croissante des SIG historiques, basés sur le cadastre napoléonien et la numérisation du cadastre parisien (les plans d'îlots de P. Vasserot de 1810-1836: Noizet 2009) ont rendu possible ce projet.

La création de ce SIG pour le Paris du début du XIX<sup>e</sup> s. était d'abord conçue comme un outil de recherche, pour permettre des analyses spatiales d'ordre synchronique et diachronique. Il s'agissait, d'une part, de permettre à des thématiciens, principalement des historiens médiévistes et modernistes, de spatialiser leurs données à un instant T: ils cherchaient ainsi à interroger

<sup>1</sup> AnaLyse diachronique de l'espace urbain PARisien: approche GEomatique. Le projet, commencé en septembre 2006, a duré 44 mois. Soutenu par l'ANR (300 k€) et le CNRS (30 k€), il est aujourd'hui hébergé par le TGE Humanum: <http://alpage.huma-num.fr/fr/>.

<sup>2</sup> LAMOP (porteur), ArScAn, le LIENSs, le L3i, mais aussi le COGIT de l'IGN, l'IRHT, le Centre de topographie historique de Paris des Archives nationales.

et manipuler leurs données afin de tester des hypothèses d'ordre spatial, ce qui était quasiment impossible jusque-là. D'autre part, étudier la morphologie urbaine dans la longue durée constituait un autre enjeu: comment le tissu urbain se forme et évolue-t-il? Quels sont, à différents moments, ses usages sociaux? Le but était d'observer la transmission des formes viaires et parcellaires par le biais de la recomposition permanente des usages sociaux de l'espace urbain.

Le parcellaire pré-industriel de Paris a été reconstitué grâce au géoréférencement, puis à la vectorisation, des 910 plans d'îlots Vasserot, qui représentaient le Paris d'alors: ceci a permis de reconstituer, avant les grands travaux du XIX<sup>e</sup> s., le tissu urbain qui était donc largement hérité des périodes médiévale et moderne (Fig. 1). Puis, à partir de ces nouvelles couches spatiales de référence (voies, îlots, parcelles, bâti, circonscriptions, adresses en 1810-1836), des données historiques médiévales et modernes ont été spatialisées, telles que les enceintes du X<sup>e</sup> au XVII<sup>e</sup> s., les hôtels aristocratiques au XIV<sup>e</sup> s., les égouts du XVI<sup>e</sup> au XIX<sup>e</sup> s., les seigneuries au XVIII<sup>e</sup> s., les foyers fiscaux en 1300, etc. Le croisement de ces données permet de reprendre l'histoire de Paris sur des bases neuves (Noizet, Bove, Costa 2013).

## 2.2 Une plateforme de webmapping ouverte à tous

Un développement original du projet, non prévu au départ, a consisté à mettre l'ensemble de ces nouveaux savoirs à la disposition de tous, par le biais d'une plateforme de cartographie numérique accessible par Internet. La quantité, la qualité et le mode collaboratif de la production des données créées dans ce projet ont en effet posé très rapidement la question de leur pérennité et de leur diffusion. De plus, nous avions besoin de centraliser la production des identifiants uniques des objets créés et des références bibliographiques: une base de données en ligne (ALPAGE-références) avait été construite dans ce but, mais comme une solution d'attente étant donné la lourdeur des procédures de travail (Noizet *et al.* 2008). Cette base a été périmée à partir du moment où a pu être construite la plateforme de webmapping Dynmap, permettant la consultation par tous des données validées par le consortium ALPAGE, la gestion des métadonnées et l'édition en ligne de nouvelles données.

L'outil se présente comme une interface SIG classique, sauf qu'ici, l'utilisateur n'a besoin que d'un navigateur pour accéder à toutes les données (Fig. 2), où qu'il soit et avec n'importe quel type de machine connectée à Internet. Dynmap, produit par la société Simalis est un outil de webmapping qui permet de faire de l'édition en ligne. Basé sur des outils logiciels et des langages open source (PHP, MySQL), il est construit selon une double logique séparant, d'un côté, le travail d'administration et d'organisation générale de la base de données (back-office) et, de l'autre, les données accessibles à l'utilisateur pour la consultation et l'édition (front-office). Les droits des utilisateurs, définis

Fig. 1 – La reconstitution du plus ancien parcellaire de Paris à partir des plans d'îlots Vasserot (1810-1836).

Fig. 2 – La plateforme de webmapping d'ALPAGE.

dans la charte, vont de la simple visualisation à l'édition et l'exportation en ligne de l'intégralité des données.

Les données coproduites par ces chercheurs sont ainsi identifiées (méta-données), visibles et modifiables dans la plateforme de webmapping. Tout un chacun peut désormais disposer de ces informations, et même produire ses propres cartes respectant les conventions cartographiques et juridiques (intégration automatique du Nord, de l'échelle, de la légende et des mentions de droits).

### 1.3 *Des échanges fructueux entre thématiciens et géomaticiens*

Une méthode de travail collaborative a été progressivement définie, grâce à des échanges fréquents entre tous les participants, dont les débats et décisions ont toujours été mis par écrit dans des comptes-rendus détaillés (au total 760 p.). Le géoréférencement et la vectorisation des 910 plans Vasserot ont ainsi été menés en croisant en permanence les besoins et l'expertise des historiens, les possibilités techniques de la géomatique et, enfin, les besoins et apports de la vectorisation automatique des parcelles par les informaticiens. Concernant les données historiques propres à chaque thématicien, il est notable que les historiens se soient appropriés les SIG et aient eux-mêmes produit leurs données, différentes pour chacun d'eux: autrement dit, ils sont restés maîtres du processus de création et n'ont pas sous-traité le travail aux géomaticiens et informaticiens, tout en bénéficiant de leur expertise. Inversement, par leurs objets et leurs questions, les historiens ont permis aux géomaticiens de tester des nouveaux outils (procédures de géoréférencement et de géocodage, plateforme de webmapping) et aux informaticiens de progresser dans la méthodologie de la vectorisation automatique des documents couleur anciens.

Une autre interaction entre SHS et STIC s'est traduite par la constitution de procédures logicielles ad hoc: l'une pour caractériser la géométrie du parcellaire (MORPHAL module intégré dans le logiciel libre OpenJUMP), l'autre pour géocoder la liste des 10.000 foyers du rôle de taille de 1300 que nous allons maintenant présenter.

## 2. Le géocodage des contribuables Parisiens en 1300

### 2.1 *La difficile spatialisation d'une source fiscale exceptionnelle*

Nous disposons de sept registres fiscaux, appelés "rôles de la taille", qui recensent entre 1292 et 1313 les contribuables payant au roi cet impôt de la taille, soit entre 6 000 et 15 000 foyers fiscaux décrits chaque année. Ils sont justement célèbres et ont été régulièrement sollicités par les historiens depuis le début de leur publication au XIX<sup>e</sup> siècle, si bien que de nombreuses cartes ont été produites à partir de ces données, qui ont été intégrées dans une base de données à l'IRHT. Mais en raison des difficultés pour fabriquer ces cartes,

jamais jusqu'à présent ces registres fiscaux n'ont été traités dans une perspective socio-topographique fine. Ils sont pourtant, de ce point de vue, une source exceptionnellement riche et précise: chaque contribuable est socialement et économiquement identifié par son nom et le montant de l'impôt qu'il doit acquitter. S'y ajoute, en proportion variable selon les années d'imposition, l'activité professionnelle de chacun, qu'il s'agisse d'un métier artisanal ou d'une activité commerciale, d'un service domestique ou encore d'une charge au service du roi, d'une cour princière ou d'une institution ecclésiastique. Surtout, chaque contribuable est précisément situé dans l'espace urbain: la ville étant découpée en circonscriptions fiscales (calquées sur celles des paroisses, parfois divisées en quêtes), les percepteurs de l'impôt dressent la liste des contribuables, au sein de chaque circonscription fiscale, suivant un itinéraire qui est précisément décrit entre chaque coin de rue, mais non dessiné dans les documents.

La spatialisation de ces données de l'ère pré-statistique permet d'étudier la répartition de la population imposable, des fortunes et des métiers à l'échelle de toute la ville médiévale. C'est pourquoi le géocodage de ces listes d'individus constitue un enjeu historique majeur.

Encore faut-il disposer de l'outil permettant de mettre en correspondance les portions de l'itinéraire suivi par les "asséurs"<sup>3</sup> de la taille (les tronçons fiscaux) et le filaire des voies de 1300 (les tronçons de voirie). Pour ce faire, nous avons créé dans le SIG une couche sur la voirie en 1300, tandis que l'informaticien Alain Layec a créé un logiciel de géocodage adapté à ces données<sup>4</sup>. Cet outil d'aide à la spatialisation des itinéraires suivis par les "asséurs" de l'impôt gère automatiquement la reconstitution géométrique des tronçons fiscaux et leur orientation en fonction de l'itinéraire suivi.

Testé sur l'année 1300 qui comporte 10.000 contribuables<sup>5</sup>, cet outil de géocodage offre plusieurs possibilités (Fig. 3):

- Dans une première étape, la visualisation et la gestion (en saisie/modification/suppression) des informations textuelles de la base de données concernant les tronçons fiscaux, leur orientation et les côtés de la rue concernés (partie supérieure de l'écran);
- Puis, dans un deuxième temps, la création et l'ajustement d'une géométrie associée aux tronçons fiscaux totalement adaptée à leur forme, à leur orientation et à leurs limites par sélection graphique de la succession des tronçons de voirie concernés (partie inférieure de l'écran, l'outil graphique en partie droite permet de sélectionner un espace et de créer et modifier les géométries);

<sup>3</sup> Soit les hommes chargés de la répartition (ou "assiette") de l'impôt dans une circonscription donnée.

<sup>4</sup> Pour une présentation plus détaillée des sources, des données SIG et de l'outil logiciel, voir: Bourlet, Bethé 2013; Bourlet, Layec 2013.

<sup>5</sup> Arch. nat., KK 283, fol. 97 à 304v.

Fig. 3 – Outil de géocodage: géométries associées aux tronçons fiscaux de la 2<sup>e</sup> quête de la paroisse Saint-Germain-l'Auxerrois.

Fig. 4 – Répartition des densités de population et des fortunes d'après le rôle de taille de 1300 dans la paroisse de Saint-Germain-l'Auxerrois.

– Lorsque les étapes précédentes ont été accomplies, il reste à procéder au géocodage automatique des contribuables, répartis de manière équidistante entre les deux extrémités du tronçon fiscal.

## *2.2 Premiers résultats dans la paroisse de Saint-Germain-l'Auxerrois*

Le résultat du géocodage dans la circonscription fiscale de Saint-Germain-l'Auxerrois montre le potentiel historique de l'outil (Fig. 4).

Tout d'abord il existe une grande disparité de densité de la population contribuable d'une rue à l'autre. Le fait que certaines rues, telles que la rue Saint-Germain-l'Auxerrois, la rue des Fossés-Saint-Germain, soient densément occupées par les contribuables sur leurs deux côtés, suggère qu'elles aient pu former des voies de pénétration importantes du quartier et jouer un rôle d'animation économique, offrant aux chalandes les produits de leurs boutiques. La rue des Moines-de-Janveau offre un profil presque opposé: peu densément peuplée, les deux côtés en ont été recensés ensemble en une seule liste, alors que les deux côtés des rues plus peuplées font l'objet de deux listes séparées. Ceci pourrait se rapporter à une structure particulière de l'habitat: on pense ici à de grandes parcelles d'hôtels traversant un îlot ou faisant le coin de deux rues dont les entrées principales sont situées sur une autre rue.

D'autres, enfin, offrent deux côtés dont le nombre de contribuables est très différent: la rue de Male Parole comporte 10 contribuables sur son rang Nord mais 21 sur son rang Sud, la rue de Béthisy en comporte 17 sur son rang Nord et 37 sur son rang Sud, etc. Ce phénomène est suffisamment répétitif pour qu'il ne s'agisse pas d'un hasard mais bien d'un trait de la structure de l'habitat: le fait que le rang Nord de la rue de Béthisy soit peu densément peuplé de contribuables pourrait trouver son explication dans la présence de vastes hôtels, celui des comtes de Ponthieu à son extrémité Ouest et, plus à l'est, ceux de Guillaume Bourdon et de Thibaud Macy. Mais l'argument de la présence d'hôtels de la grande bourgeoisie ne tient guère si l'on en croit l'exemple de la rue de Male-Parole dont le côté Sud, le plus densément peuplé, est justement celui qu'occupe l'hôtel de Guillaume Bourdon le vieux. Dans ce cas, il faudrait chercher ailleurs l'explication.

Si l'on regarde comment les contribuables se répartissent autour de chaque îlot d'habitation, la norme n'est pas une répartition régulière. Ce qu'on observe, ce sont plutôt des îlots dont deux côtés sont densément peuplés et deux autres moins peuplés. Cette répartition, si elle n'est pas le fruit d'une forme de ségrégation sociale des plus pauvres qui seraient établis dans certaines rues<sup>6</sup>, pourrait être due à la permanence d'une structure des îlots

<sup>6</sup> Mais ce n'est pas le modèle parisien dans lequel richesse et pauvreté cohabitent souvent dans les mêmes rues (Geremek 1976, 79-92).

d'habitation antérieure à l'époque de Philippe le Bel mais conservée depuis. Nous avons superposé les îlots médiévaux et le parcellaire du temps de Vasserot qui présente en certains endroits quelques traits hérités de périodes plus anciennes qui correspondent bien à ce que la distribution des tailles laisse entrevoir. Les rues avec une forte densité de contribuables correspondent en effet souvent à un parcellaire serré chez Vasserot, ainsi dans la rue Saint-Germain-l'Auxerrois.

Cette carte confirme aussi et précise visuellement la réelle disparité de la densité de la population contribuable entre les îlots d'habitation les plus proches des murs de Philippe Auguste et ceux, nettement plus denses, qui se trouvent au cœur de la rive droite, aux abords du Châtelet. De même, la contribution par feu et à l'hectare de cette paroisse n'est pas également répartie dans toutes les quêtes. L'augmentation globale de la richesse au fur et à mesure que l'on s'approche du centre apparaît clairement: hors les murs 78% des 177 contribuables payent moins de 10 sous, la moitié d'entre eux n'étant d'ailleurs taxée qu'à 2 sous, seuil minimum en-deçà duquel on échappe à l'impôt. Dès que l'on passe l'enceinte, le nombre des contribuables aisés, de ceux qui payent plus d'une livre, augmente significativement: de 10% de la population hors les murs, il passe à 28% de la population dans les murs, atteignant même 34% des taillables de la 3<sup>e</sup> quête et 39% de ceux de la 6<sup>e</sup> quête.

La répartition de la richesse au fil des rues et des îlots est tout aussi irrégulière. Certaines rues et quartiers attirent la richesse, c'est le cas des axes de circulation principaux de la ville qui encadrent la paroisse: la rue de la Sellerie, qui la borde à l'est, prolonge la rue Saint-Denis jusqu'au Châtelet et au Grand Pont. Dans cette rue, seuls 12 contribuables (27%) payent moins de 10 sous et la moyenne des contributions des feux s'élève à 64 sous. La rue Saint-Honoré, beaucoup plus longue, est plus diversement habitée, mais elle concentre de belles fortunes notamment aux abords des Halles de la draperie et la contribution moyenne par feu dans cette rue en encore élevée (37 sous).

À l'intérieur de la paroisse, le paysage est loin d'être homogène. S'ajoutant à une réelle disparité des densités de contribuables, les niveaux de taxation des rues témoignent d'une grande diversité des profils. La rue Saint-Germain-l'Auxerrois, véritable voie de pénétration dans la paroisse par le Sud, présente un profil semblable à celui de la rue Saint-Honoré. Très longue et un peu plus prospère (41 sous/feu en moyenne), elle n'offre pas non plus un profil unique: plus densément peuplée dans sa partie orientale que dans sa partie occidentale, elle est plus riche à ses deux extrémités qu'en son milieu (57 sous/feu entre le port de l'École et la rue Thibaut-aux-dés, encore 47 sous à l'est de la rue des Lavandières, mais 32 sous au centre entre rue des Lavandières et rue Thibaut-aux-dés). L'une des explications possibles de ces différences de

niveaux de fortune pourrait résider dans les activités prédominantes attestées par la source fiscale elle-même, soit d'Ouest en est: commerce du bois au port de l'école, travail du cuir et mégisserie au centre de la rue et orfèvrerie à l'est, à proximité du Châtelet.

D'autres rues offrent des profils de fortune différents sur leurs deux côtés: le côté Nord de la rue de Béthisy, dont on a déjà signalé qu'il était moins peuplé que le rang Sud, est aussi plus richement habité, ce qui renforce l'hypothèse de grandes parcelles bien habitées sur le rang Nord et de parcelles plus serrées de logements ordinaires sur le rang Sud. D'autres rues présentent des profils de populations dont les niveaux de contribution et de fortune sont plutôt homogènes, dans l'opulence, telle la rue des Déchargeurs (49 sous/feu) ou la rue de Male-Parole, mais aussi dans la plus grande précarité: la rue de Richebourg, qui longe le rempart est la seule rue hors les murs qui soit aussi densément peuplée que la rue Saint-Honoré. Elle offre cependant un profil bien différent de cette dernière, car la contribution moyenne par feu y est extrêmement faible (3 sous): 17 des 33 taillables ne sont taxés qu'à la tranche fiscale minimale de 2 sous; les artisans de l'industrie textile de transformation – tisserands de linge ou de drap, fileresses de soie – et les fripiers qui l'habitent sont souvent à la limite de l'indigence.

### 3. Conclusion

Formant ce que les sociologues des organisations appellent "une communauté de pratiques", les chercheurs du projet ALPAGE ont construit une banque de données géohistoriques solide et référencée sur le Paris médiéval et moderne. Ils ont pu poser des questions historiques nouvelles, ou restées jusque-là sans réponse faute d'outil et de données adaptées. Le géocodage des contribuables en 1300, qui permet d'analyser finement la socio-topographie urbaine, à partir de la répartition des fortunes et des métiers des foyers fiscaux, en est un bon exemple. Il incite à réinvestir les documents historiques en interrogeant véritablement leur dimension spatiale: ce qui était concrètement infaisable en l'absence d'un SIG est désormais possible. Ces données ont aussi le mérite d'être librement accessibles via la plateforme de webmapping, qui restitue ainsi à la société civile des savoirs produits dans les cercles scientifiques.

Caroline Bourlet  
CNRS UPS 2275 IRHT

Laurent Costa  
CNRS UMR 7041 ArScAn

Hélène Noizet  
Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, UMR 8589 LAMOP

## BIBLIOGRAPHIE

- Bourlet C., Bethé A.-L. 2013, *Création de plans de référence pour la fin du Moyen Âge: îlots, voirie, paroisses, quêtes*, in Noizet, Bove, Costa 2013, 147-157.
- Bourlet C., Layec A. 2013, *Densités de population et socio-topographie: la géolocalisation du rôle de taille de 1300*, in Noizet, Bove, Costa 2013, 215-237.
- Geremek B. 1976, *Les marginaux parisiens aux XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> siècles*, Paris, Flammarion.
- Darin M. 1998, *The study of urban form in France*, «Urban Morphology», 2, 2, 63-76.
- Noizet H. 2009, *Les plans d'îlots Vasserot, support d'un système de l'information géographique historique de Paris*, EAV, «La revue de l'école nationale supérieure d'architecture de Versailles», 14, 86-95.
- Noizet H., Bove B., Costa L. 2013, *Paris de parcelles en pixels. Analyse géomatique de l'espace parisien médiéval et moderne*, Paris, Presses universitaires de Vincennes-Ville de Paris.
- Noizet H., Dallo A., Blary G.-X., Costa L., Pouget F. 2008, *ALPAGE: towards the setting-up of a collaborative tool*, in F. Djindjian et al. (eds.), *Webmapping dans les sciences historiques et archéologiques, Actes du Colloque international (Paris 2008)*, «Archeologia e Calcolatori», 19, 87-101.

## ABSTRACT

The ALPAGE project is conducted by a large team of archaeologists, historians, geomatics and computer scientists coordinated by Hélène Noizet, totalling about twenty researchers from several laboratories, including the LAMOP, ArScAn, LIENS, L3i as well as IGN-COGIT, IRHT, and the Centre de topographie historique de Paris (National Archives). Together they built a historical GIS, in order to examine the spatial dimension of historical events for the city of Paris. The project began in September 2006, lasted 44 months, and it is now hosted by the TGE Humanum (<http://alpage.huma-num.fr/fr/>). Through a digital webmapping platform accessible via the Internet, information co-produced by the researchers can be superimposed on present-day spatial data (blocks, parcels, roads, addresses). After presenting the general framework of the project and the application of webmapping tools, the authors illustrate the results coming from the analysis of a database which collects a series of tax records dating back to the period of Philippe le Bel, conducted together with the IRHT-CNRS, and its integration within the ALPAGE GIS platform.

## LE WEBMAPPING: OUTIL DE TRAVAIL DES ARCHÉOLOGUES. EXEMPLE DU PROJET MARAIS DE BROUAGE

Notre objectif est ici de proposer un retour d'expérience méthodologique sur la mise en place et l'utilisation d'une plateforme de "webmapping" dans le cadre d'un projet collectif de recherche (PCR) en archéologie: nous aborderons successivement dans cet article le contexte, les aspects techniques de la solution, le contenu de la plateforme et nous illustrerons ensuite en présentant des exemples d'utilisation par les chercheurs.

### 1. Contexte du projet

Ce projet s'inscrit dans un programme de recherche intitulé "Les marais littoraux charentais du Moyen Âge à l'époque moderne: peuplement, environnement et économie". Le cadre géographique de ce projet porte sur des marais côtiers qui s'étendent entre la Charente et la Seudre, sur le littoral centre-Ouest français, au Sud de la Rochelle (Fig. 1)

Ces milieux de marais littoraux sont en constante évolution depuis le début de notre ère. À l'époque gallo-romaine, cet espace était très probablement largement (ou fréquemment?) recouvert par la mer et a fait l'objet ensuite, d'un processus de comblement progressif. Les populations littorales ont très tôt trouvé un intérêt à fréquenter ces milieux, comme l'atteste la présence de nombreux sites de production de sel d'époque gauloise sur le pourtour présumé de cet ancien golfe.

Les populations ont ensuite profité de ces zones peu profondes pour les aménager en source d'approvisionnement alimentaire (pêcheries, etc.) ou en source de production salicole (marais salants), voire en zones agricoles ou d'élevage. Du Moyen-Âge à l'Epoque Moderne, diverses activités humaines se sont ainsi succédées et ont laissé des traces plus ou moins visibles sur ces espaces littoraux: infrastructures d'exploitation salicoles, ports, implantations monastiques, fours à potiers, fours à tuiles, ...

Les recherches lancées dans le cadre de ce PCR portent sur l'étude de ces populations littorales, leur cadre de vie, leur habitat, leur alimentation, et leurs activités économiques. La multiplicité des thématiques abordées impose d'avoir recours aux compétences de chercheurs de nombreuses disciplines: archéologues, historiens, archéozoologues, géographes, géophysiciens, naturalistes, ethnologues, etc.

Ces chercheurs, bien qu'intervenant dans des champs disciplinaires différents partagent tous le même espace et tendent tous vers le même but: reconstituer le cadre et le mode de vie des habitants de ces zones côtières sur

Fig. 1 – Situation de la zone d'étude: les marais de Brouage.

une période allant du Haut Moyen-Âge à l'époque contemporaine. Cette ambition nécessite la mobilisation de multiples informations géolocalisées sur ce territoire.

## 2. L'évidence du besoin d'un outil de mutualisation de la donnée géo localisée

Tous les chercheurs du projet partagent un espace commun et ont besoin d'informations géographiques communes. Ce "dénominateur commun spatial" nous est apparu comme pouvant constituer un point de convergence fort entre les chercheurs. Les outils de "webmapping" permettent aujourd'hui de concrétiser cette ambition et d'enclencher une dynamique de partage et de fédération de connaissance, sur une base spatiale. La mise en place d'une "plateforme de webmapping" pour gérer l'information géographique de ce projet a donc été décidée.

## 2.1 *Quels sont donc les objectifs recherchés dans cette démarche?*

L'objectif premier est de permettre à la communauté de chercheurs travaillant sur ce territoire d'accéder facilement à un corpus d'informations localisées: donner un moyen d'accès, simple, par le biais d'un simple navigateur Internet à des cartes anciennes et actuelles, du cadastre ancien et contemporain, des photographies aériennes, des données altimétriques LIDAR, etc.). Toutes ces données ayant été au préalable sélectionnées, préparées, mises en forme, spécifiquement pour ce projet. La seconde ambition de cette opération a été de développer progressivement une dynamique d'échange et de partage d'informations au sein de la communauté des chercheurs impliqués dans ce projet.

Comme nous le montrerons plus en avant, un tel outil permet plus qu'un simple accès à de l'information figée: il permet à chaque participant d'apporter sa propre contribution, tout en bénéficiant également de celle de ses collègues.

## 2.2 *Qu'est-ce donc qu'une plateforme de "webmapping"?*

– *Un accès web à des données spatialisées actuelles et anciennes:* Pour le chercheur, cet outil est un site web auquel il accède par le biais d'une connexion personnalisée (nom de l'utilisateur et mot de passe). Sur ce site le chercheur va pouvoir visualiser son territoire de travail, y consulter des données géographiques, actuelles ou anciennes, des informations issues de bases de données archéologiques, mais aussi des informations qu'il a intégré lui-même (par exemple localisation de ses propres objets ou résultats de recherche), ou que d'autres chercheurs ont eux mêmes intégré.

– *Un accès aux informations par requêtes:* L'utilisateur peut effectuer des recherches, sur des critères de localisation ou sur de simples critères attributaires.

– *Une possibilité d'intégrer de nouvelles informations:* Le chercheur peut également ajouter des informations décrivant les d'objets spatialisés, ou divers documents décrivant les objets ou les phénomènes étudiés (textes, photos, etc.). Des fonctionnalités simples à mettre en œuvre lui permettent également de créer de nouveaux objets localisés (sous forme de point, ligne ou polygone).

– *Des possibilités d'analyse et de cartographie:* Outre la consultation et la saisie d'informations, le site de Webmapping permet de modifier la représentation cartographique des informations présentées (analyses thématiques) et permet également de préparer d'imprimer des cartes.

– *Un accès simple et convivial:* Tous les membres du projet ont la possibilité d'accéder aux fonctionnalités de cet outil. La simplicité de la solution choisie n'impose aucune compétence technique particulière: sa prise en main est rapide, simple et intuitive, même sans aptitude avancée en informatique.

### 2.3 Contraintes techniques:

D'un point de vue plus technique, la mise en place d'une telle plateforme nécessite:

- Un logiciel de "webmapping" (dans notre cas ce logiciel s'appelle Dynmap);
- Un serveur (c'est à dire un ordinateur relié à Internet sur lequel est installé un logiciel comme Microsoft Windows server par exemple) pour héberger la base de données;
- Un logiciel SIG pour préparer les données cartographiques de base et les placer sur le serveur (par exemple le SIG ArcGis);
- Un administrateur/animateur qui gère le système, attribue les droits d'accès et "fait vivre" le site: aide les utilisateurs, répond à leurs attentes en ajoutant des contenus, améliore les interfaces d'accès aux données, etc.

## 3. Mise en place de la plateforme de «webmapping»: Dynmap

### 3.1 Choix de la solution

La solution mise en place en 2011 est la technologie Dynmap (société SIMALIS). Trois raisons ont dicté ce choix:

- Une première expérience réussie: le laboratoire LIENSs avait déjà utilisé cet outil avec succès dans le cadre d'un précédent programme historique sur Paris: projet "ALPAGE", plateforme cartographique sur Paris au Moyen-âge ([http://websig.univ-lr.fr/alpage\\_public/flash/](http://websig.univ-lr.fr/alpage_public/flash/));
- Une simplicité d'emploi: l'expérience du travail sur cet outil avait montré qu'il était facilement maîtrisable tant du point de vue des utilisateurs finaux que du point de vue de l'administrateur qui met en place, intègre les fonds cartographiques et gère le site;
- Accessibilité financière: le développement d'une nouvelle plateforme de "webmapping" n'a impliqué aucun coût financier supplémentaire pour le laboratoire: le logiciel Dynmap une fois acquis, permet de générer autant de plateformes de "webmapping" que l'on souhaite (simple paiement annuel des frais de maintenance éventuel).

### 3.2 Mise en place de la plateforme

- *La création du socle de données de base:* Plus de 80 données géographiques sont actuellement accessibles par le biais de cet outil. Ces données ont été intégrées progressivement depuis le démarrage de l'opération en 2011. Tout d'abord un premier socle de données a été construit entre février et mars 2011. La montée en charge s'est ensuite déroulée au fur et à mesure de l'avancée des travaux du PCR, en fonction des demandes des utilisateurs. Pour intégrer

des données dans la plateforme de “webmapping”, les principales tâches à réaliser ont été les suivantes:

- Sélectionner les données, les rechercher, les vérifier;
- Réaliser les extractions des données sur le territoire de travail;
- Effectuer le géoréférencement des données non géoréférencées;
- Mettre au format requis, (format shape pour les données vectorielles et JP2000 pour les données image);
- Placer les données sur le serveur dédié à Dynmap, à l’université de La Rochelle et effectuer les paramétrages (choix des symboles, couleurs, de l’affichage des attributs, organisation de la table des matières, etc.). Cette opération est effectuée par l’intermédiaire d’une interface de type “backoffice”, simple d’emploi gérée et par l’administrateur qui n’a besoin d’aucune compétence en développement informatique;

*-Intégration des données géographiques actuelles:* Les données géographiques actuelles étant déjà géoréférencées, leur intégration nécessite uniquement une bonne pratique des outils SIG. Les photographies aériennes et les données LIDAR doivent par contre faire l’objet d’un travail de préparation: choix des couleurs, amélioration du contraste, et intégration d’images d’ombrage pour le LIDAR puis mise au format JPEG2000. L’outil n’autorisant aucun ajustement des couleurs en ligne, les données doivent être traitées en amont pour qu’elles soient les plus claires et aussi précises que possible. Pour certaines données actuelles (provenant de l’IGN en particulier) il est à présent possible d’intégrer dans le site un lien Internet qui va permettre d’accéder à ces données directement sous forme d’un flux (protocole WMS de l’Open Geospatial Consortium), ce qui évite la démarche de préparation et permet de plus de bénéficier de données à jour en permanence. Ce mode opératoire est en train de se généraliser rapidement, du moins pour les données de type référentiel comme des cartes ou des photographies aériennes actuelles;

*- L’intégration des données anciennes:* L’intégration des données cartographiques anciennes est par contre la tâche la plus délicate et la plus longue. Le géoréférencement d’une carte comme celle de Claude Masse (datant approximativement de 1700, échelle d’environ 1/28000<sup>e</sup>), sur une zone de 30km\*30km demande à la fois un temps important et une technique éprouvée (près de 100 points de calage employés). Des déformations locales sont en effet nécessaires pour obtenir une bonne superposition avec les autres couches d’informations sur tout le territoire couvert.

Par contre, le géoréférencement des plans cadastraux napoléoniens, réalisé individuellement, section par section, puis assemblés au niveau communal a pu être réalisé sans difficulté majeure. La bonne qualité géométrique des plans (du moins dans notre secteur d’étude), et leur échelle plutôt grande

(1/2000<sup>e</sup> environ) facilitent en effet ce travail qui nécessite néanmoins un certain savoir faire en géomatique.

L'intégration des données issues des bases de données archéologiques nécessite uniquement une sélection des informations, le choix des symboles de représentation et la détermination des attributs à visualiser sur le site.

### 3.3 Présentation du contenu de la plateforme de "webmapping" Dynmap

Cette plateforme donne accès à un corpus d'informations géolocalisées se répartissant en 3 catégories:

- Des informations cartographiques et aériennes anciennes et actuelles;
- Des informations historiques issues de bases de données (inventaires de sites et monuments historiques) ou de documentation (thèses, publications);
- Des informations issues des opérations de recherche, produites en cours de projet (prospections pédestres, données de géophysique, photo-interprétation ou carto-interprétation, résultats de fouilles, etc.) issues de travaux des différents chercheurs.

Les informations cartographiques et aériennes anciennes et actuelles

#### 1. Données actuelles:

- Carte topographique, IGN, Echelle 1/25000;
- Carte géologique, BRGM, Echelle 1/50000;
- Cadastre actuel, Echelle 1/2000 env.;
- Bases de données de l'Institut Géographique National (routes et chemins, hydrographie, courbes de niveau);
- Tracé du trait de côte actuel (trait de côte Histolitt IGN);
- Données altimétriques à haute résolution: LIDAR (donnée LITTO3D IGN);
- Données altimétriques à basse précision sur une zone plus large que le territoire d'étude (MNT BDTPO);
- Photographies aériennes couleur orthorectifiées (IGN), résolution 50 cm;
- Photographies aériennes prise de vue INFRAROUGE couleur, provenant de l'ex Inventaire Forestier National (IFN);
- Images du satellite SPOT 5.

#### 2. Données anciennes:

- Cadastre napoléonien (année 1830 env.);
- Carte ancienne de Claude Masse, Ingénieur géographe du Roi, XVIII<sup>e</sup> siècle, Echelle 1/28000<sup>eme</sup> env.;
- Plan terrier de 1770;
- Plan de la forteresse de Brouage (1780);
- Photographies aériennes de 1950 (IGN);

Les informations historiques issues de bases de données:

- Inventaire de sites archéologiques provenant de la base de données "Patriar-che" (gérée par le Service Régional de l'Archéologie) et de sociétés archéolo-giques locales (Archéaunis et Société de Géographie de Rochefort);
- Carte de datation des salines (REAULT-MILLE 2003);
- Localisation des fortifications du littoral (Les fortifications du littoral de Charente-Maritime, Nicolas Faucherre).

Informations issues des recherches, produites en cours de projet (état fin novembre 2011):

- Prospections pédestres d'ateliers de fours de potiers (Pierre-Philippe Robert, Archéaunis);
- Localisation des zones prospectées (contour des zones);
- Localisation des fours (ponctuels);
- Zones d'épandage de tessons de céramique;
- Localisation de cabanes de marais, (repérées sur cadastre ancien par Eric Normand);
- Inventaire de sites aristocratiques: maisons nobles, fortifiées ou anciens châteaux d'origine médiévale (Eric Normand);
- Localisation de constructions et de fours sur le versant Nord du promontoire de la tour de Brou. (Eric Normand - Frédéric Pouget - Guillaume Bellec);
- Cartes de prospections géophysiques électriques au bas du promontoire de la tour de Brou. (Vivien Mathé, LIENSs);
- Localisation d'anciennes carrières abandonnées d'exploitation d'argile (re-lévés effectués sur photographies aériennes de 1950). (Frédéric Pouget);
- Identification de tumulus d'après interprétation des images LIDAR;
- Informations extraites à partir des cartes anciennes de Claude Masse;
- Réseau de voies de circulation, chenaux de marais, zones habitées, châteaux, logis, paroisses, abbayes, églises, moulins à vent et à eau, ports et anciens ports;
- Informations toponymiques (lieux-dits et objets divers);
- Indications surfaciques de caractérisation d'anciens marais ne produisant plus de sel au XVII<sup>e</sup>;
- Résultats de fouilles: secteurs de La Gripperie et Brouage (Inrap).

#### 4. Utilisation du site de Webmapping par les chercheurs

Le premier point d'intérêt manifesté par les chercheurs est la centra-lisation de l'information. Cet outil permet de regrouper une information auparavant dispersée, présente sur des supports différents (cartes, bases de données, publications, photographies, etc.), à des échelles variées et souvent à rechercher dans des fonds documentaires différents.

Fig. 2 – Présentation de l'interface du site de “webmapping” (logiciel Dynmap).

Fig. 3 – Tracé des chemins sur la carte de Claude Masse (secteur de La Gripperie Saint-Symphorien).

Le second point important est le géoréférencement: les informations ne sont pas seulement regroupées, elles sont de plus géoréférencées, ce qui présente l'énorme avantage de pouvoir immédiatement les superposer, donnant ainsi la possibilité d'opérer en un instant tous les recoupements souhaités dans le cadre des réflexions et questionnements.

Le troisième avantage est la démocratisation de l'accès à l'information. Outre le fait qu'une information dispersée se trouve regroupée, on peut également mettre en avant le fait que le "webmapping" permet d'offrir un accès plus large à certaines informations qui autrefois restaient uniquement dans des publications de recherche ou dans des fonds documentaires d'accès restreint. Le "webmapping" propose en effet un mode de diffusion complémentaire à celui classiquement utilisé, et institutionnellement valorisé: la publication scientifique. Certains résultats scientifiques, qui ont une forte composante spatialisée sont généralement seulement diffusés sous forme de figures ou de cartes, insérées dans un texte, et non sous forme de données géographiques, géoréférencées, ou de bases de données. Cela rend l'accès à ces informations peu simples lorsqu'on souhaite intégrer ces nouvelles connaissances dans un système d'information.

Le "webmapping" se présente donc comme un moyen efficace d'amélioration de l'accès à l'information spatialisée: il permet à toute une communauté de chercheurs de s'approprier efficacement et simplement une information autrefois dispersée, non géoréférencée et parfois difficilement accessible pour cause d'obstacles techniques ou institutionnels. Cette communauté peut être limitée à un groupe de chercheurs bien identifiés comme nous le présentons ici. Elle peut également être très largement étendue comme nous le montrons dans l'exemple mentionné ci-dessus: projet ALPAGE sur Paris qui a une version grand public ouverte à tous les internautes. (<http://alpage.tgeadonis.fr/index.php/fr/>)

#### *4.1 Les différentes situations d'utilisation du site de webmapping*

– *Le "webmapping" outil collectif, lors des réunions de recherche:* L'outil est quasiment systématiquement utilisé lors des réunions du groupe de travail. Depuis sa mise en place, il a progressivement trouvé sa place pour devenir à présent un outil structurant permettant d'appuyer les présentations des chercheurs: il permet de présenter la zone d'étude, de manière claire et précise et avec de plus la faculté instantanée d'effectuer superpositions, recoupements, mesures, vérifications d'état à d'autres périodes, consultation de données issues de diverses bases de données, etc. Il se révèle précieux pour valider ou invalider des hypothèses, répondre à des questions "à chaud", faire des mesures, lancer de nouvelles pistes, etc.

– *Le "webmapping" outil individuel d'aide à la recherche:* Chaque chercheur bénéficie d'un accès instantané à un large corpus d'informations spatialisées sur son territoire d'étude. Il peut alors, au gré de ses réflexions, mobiliser les

Fig. 4 – Point de localisation d’un vestige de four de potier médiéval, le long d’un ancien chemin, et fiche de saisie Dynmap (La Gripperie).

rogations. Une sorte de “fouille spatio-temporelle” lui est alors proposée, en allant d’un point à un autre, d’une époque à une autre, selon l’évolution de ses questionnements.

Nous présenterons ici quelques petits exemples, de portée scientifique limitée, mais dont le but est simplement illustratif.

#### *4.2 Premier exemple: localisation de sites de fours à potiers (époque médiévale)*

Dans le cadre de la préparation de ses missions terrain, le prospecteur intéressé par la recherche d’anciens fours de production de céramique repère grâce à la carte de Claude Masse (1700) l’existence d’un ancien chemin (Fig. 3), qui n’apparaît plus sur le cadastre napoléonien (1833). La superposition du tracé des chemins de la carte de Claude Masse à la photographie aérienne actuelle guide ses recherches sur le terrain, le long de cet ancien tracé. Une concentration isolée de tessons (Fig. 4) est alors localisée, actuellement située au milieu d’une parcelle cultivée. Cette information est alors immédiatement reportée par le prospecteur lui-même, sur le site de “webmapping”. L’opération est extrêmement simple: il suffit de

Fig. 5 - Cabanes de marais et fours de potiers localisés par les chercheurs.

sur la photographie aérienne), de remplir les éléments descriptifs dans la fiche qui apparaît à l'écran (type de four, auteur, source, époque, description, etc.) l'information est alors stockée et accessible au reste de la communauté.

À ce jour, une douzaine de fours à potiers d'époque médiévale a été ainsi localisée sur le site de "webmapping". En suivant une démarche similaire, d'autres types d'objets archéologiques ont été découverts comme d'anciennes cabanes de marais, positionnées à l'aide du cadastre de 1833 et reportées sur la photographie aérienne en vue d'investigations sur le terrain et éventuellement de fouilles (Fig. 5).

Le site de "webmapping" du projet se révèle donc être un nouvel outil permettant aux chercheurs de mobiliser rapidement diverses informations

localisées, de positionner des découvertes, et de partager immédiatement ces nouvelles connaissances avec les autres membres de sa communauté.

#### 4.3 *Deuxième exemple: évolution de l'occupation humaine sur le secteur d'étude*

Ce deuxième exemple montre comment, une fois intégrées les informations géohistoriques sur ce territoire il est possible de visualiser et d'analyser l'évolution de l'occupation humaine. La première figure (Fig. 6) montre la localisation des "sites de production de sel" de l'époque gallo-romaine représentés sur un fond "modèle numérique de terrain" représentant le relief de la zone. La courbe d'altitude 5m a été superposée (en noir) et on peut remarquer une troublante proximité entre la localisation des sites de production de sel et ce niveau de 5 mètres environ. Cette quasi parfaite concordance apporte ainsi un élément d'information précieux dans les recherches liées à la détermination de la position du trait de côte à l'époque gallo-romaine. Nous n'en tirerons pas de conclusion immédiate mais nous indiquons simplement que la réflexion sur ce problème se trouve ici enrichie, et que par la suite d'autres sites pourront être ajoutés, les corrélations avec les habitats contemporains pourront être réalisées, des études sur les conditions topographiques locales de ces sites pourront être faites, etc.

Pour compléter les investigations sur cette occupation de l'espace, l'ajout des sites archéologiques de l'époque pré et protohistorique (Fig. 7) montre clairement les lieux d'occupations privilégiés, en bordure du littoral, sur les positions dominantes, en bordure des zones basses de marais actuels.

À l'époque médiévale (Fig. 8), on peut noter le regroupement des zones d'occupation à proximité des zones de salines, représentées par les zones délimitées par des polygones (Reault-Mille 2003).

Dans ce deuxième exemple, le site de "webmapping" est utilisé comme un outil de représentation cartographique, permettant de présenter des états d'un territoire à des époques différentes. Il constitue un moyen de cartographier les informations présentes dans une base de données. Il permet également de mieux appréhender l'environnement de ces sites en les visualisant dans leur contexte géomorphologique et humain.

#### 4.4 *Le "webmapping" outil de création et de partage d'informations*

La collecte d'informations de différentes natures, la géolocalisation et leur représentation cartographique ne sont pas les seuls avantages offerts par une plateforme de "webmapping".

Il est aussi possible d'utiliser une telle plateforme pour créer et partager des informations issues de recherches en cours, et ce, au fil des découvertes, en quasi temps réel.

Fig. 6 – Localisation d'anciens sites de production de sel par rapport à la courbe d'altitude 5 m.

Fig. 7 – Vestiges datés d'époques pré et proto historiques (issus de la base Patriarche) autour du marais de Brouage.

Fig. 8 – Regroupement des occupations médiévales à proximité des salines du marais de Brouage.

*Exemple: saisie de zones de prospections.* Nous avons déjà mentionné l'exemple de notre prospecteur qui de retour dans son bureau se connecte sur le site, localise l'emplacement de sa découverte (concentration de tessons), et saisit ensuite les informations descriptives dans une fiche attributaire. Afin de compléter l'information sur sa démarche il va également effectuer le tracé des zones prospectées en dessinant à l'écran le contour de ces zones et en rajoutant dans la fiche les informations associées (date, observations, etc.).

Ces données en ligne sont alors immédiatement rendues accessibles aux autres membres du programme de recherche. Les autres prospecteurs connaîtront alors précisément les zones déjà prospectées. Se pose bien évidemment le problème de la diffusion ou non de certaines informations: il est bien évidemment possible de conserver un caractère confidentiel à certaines informations: chaque utilisateur dispose d'un espace personnel qui lui permet d'y saisir des informations, qui seront alors visibles uniquement par lui-même.

Le site de webmapping peut être également utilisé comme un outil de saisie d'informations à partir de documents cartographiques. Outre la saisie d'informations de nature ponctuelles ou surfaciques, comme nous venons de le présenter, il est également possible de saisir des informations de type

Fig. 9 – Secteur de Brouage: tracé des traits de côte de différentes époques sur fond de carte actuelle.

comme par exemple des tracés d’anciens chenaux ou de délimitation de trait de côte à différentes dates.

Donner la possibilité aux chercheurs eux même d’effectuer ces acquisitions d’informations au plus près des sources est à notre avis une démarche intéressante. L’interprétation de la source sera faite avec une plus grande finesse, si elle est faite par le chercheur lui-même; cela lui donne de plus la possibilité d’obtenir immédiatement des validations, des réponses à des interrogations, en comparant avec une autre source (carte d’une autre date, photographie aérienne, cartes issues de la géophysique, carte géologique, LIDAR, etc.)

Nous pensons qu’un niveau supérieur de qualité peut être ainsi atteint dans la détermination des “faits géolocalisés” par rapport à la réalisation to-

talement déléguée à un technicien. Notre discours n'entend aucunement nier l'utilité des personnels techniques pointus, qui sont hautement indispensables pour assurer les tâches de mise en place des outils de SIG, de "webmapping", pour réaliser des analyses spatiales, des représentations cartographiques avancées. Notre affirmation est que nous entrons certainement avec le "webmapping" dans une nouvelle ère. Cette évolution des pratiques est comparable au changement intervenu dans les années 80 lorsque le chercheur s'est progressivement dispensé de recourir à une secrétaire pour écrire son courrier et ses rapports: d'une manière analogue il va maintenant s'appropriier les outils de consultation et de saisie de l'information géographique. Les outils de "webmapping" par leur facilité d'emploi vont peut-être occuper pour l'information spatialisée, un rôle similaire à celui qu'occupent les outils de traitement de texte pour l'information écrite.

*Saisie d'informations sur une carte ancienne.* L'outil Dynmap permet au chercheur d'effectuer en ligne la saisie d'objets vectoriels sur un fond de carte ou sur une photographie aérienne. Nous avons par exemple réalisé la saisie de tous les chenaux de marais sur la carte ancienne de Claude Masse (1700). Nous présentons également sur la Fig. 9 le tracé du trait de côte dessiné sur cette même carte, et superposé au trait de côte actuel, le tout présenté sur un fond de carte topographique de l'Institut Géographique National. Cette possibilité est intéressante car elle donne à tout utilisateur la possibilité, sans avoir à employer un logiciel SIG (qui nécessite un apprentissage lourd), de créer sa propre information géographique à partir de n'importe quel document déjà intégré sur le site.

## 5. Conclusions

Nous avons donc montré ici quelques exemples d'utilisation d'une plateforme de webmapping. Nouveau mode d'accès et de partage de l'information géographique, un tel outil, profitant de l'universalité et de la rapidité de diffusion d'Internet offre une mise à disposition précise et instantanée des informations localisées. La plateforme de webmapping se révèle donc être tout d'abord un outil de capitalisation et de diffusion d'informations géolocalisées. Par les possibilités de saisie en ligne, il s'avère de plus être un moyen simple et efficace pour constituer et enrichir une base de données d'informations spatialisées.

Comme nous venons de le voir au travers des cas présentés, ce type d'outil offre de plus l'avantage d'instiller une dynamique de partage (immédiat ou différé) des informations produites par les chercheurs.

Dans un projet de type PCR (Projet Collectif de Recherche), en archéologie, le partage quasi-instantané rendu possible par cet outil se présente comme un moyen fort pour renforcer le caractère collectif de la recherche au sein du

groupe de chercheurs, mais également pour diffuser certaines informations vers l'extérieur.

Mais cet outil ne se limite pas à une simple interface de saisie ou de consultation de données, il se positionne également comme une sorte d'"outil d'aide à la réflexion". Nos expériences ont montré combien ce genre de plateforme pouvait être utile dans les démarches d'analyse en intégrant ensemble des données qui étaient autrefois sur des supports variés et hétérogènes. Il prend alors rapidement une place centrale à disposition des chercheurs confrontés à la gestion d'informations ayant une composante spatiale. L'ensemble de ces intérêts, combiné aux évolutions technologiques récentes et au mouvement actuel de libéralisation de l'accès aux données géographiques laisse donc présager un développement rapide de l'usage de ce genre de solution, notamment dans le domaine de l'archéologie.

Frédéric Pouget  
UMR 7266 (LIENSs),  
CNRS – Université de La Rochelle

## BIBLIOGRAPHIE

- Blary G.-X., Costa L., Dallo A. 2013, *Une plateforme de Webmapping pour le programme ALPAGE: Outil de travail et de diffusion des données*, in H. Noizet, B. Bove, L. Costa (eds.), *Paris de parcelles en pixels. Analyse géomatique de l'espace parisien médiéval et moderne*, Paris, Presses universitaires de Vincennes-Ville de Paris, 77-88.
- Pouget F. à paraître, *Mobilité du trait de côte et cartographie historique*, in *Les littoraux à l'heure du changement climatique, Actes du colloque (Rochefort-Brouage-La Rochelle 2010)*.
- Réault-Mille S. 2003, *Les marais charentais, géohistoire des paysages du sel*, Espace et Territoires, Presses Universitaires de Rennes, Rennes.

## ABSTRACT

Under the PCR (Collective Research Project) entitled "The Charentais marshes from the Middle Ages to the modern era: population, environment and economy" a webmapping platform was implemented. The goal is to reconstruct the context and the lifestyle of the inhabitants of these coastal areas over a period from the Early Middle Ages to modern times. This requires multidisciplinary research work, which involves a process of gathering information from multiple sources in that territory. The webmapping site allows the integration of geographic data, nature, provenance and various dates, and makes them accessible in a simple manner to all members of the project. Researchers can then easily cross-check all this information, which supports different thoughts, assumptions and conduct analyses. The tool also allows users to acquire new information, for example from new discoveries or simply from maps, documentation or existing databases. The webmapping site quickly took a central place in the project. The various examples presented in this article illustrate the interest of such a solution which suggests a rapid development of the use of this kind of platform in the field of archeology.

## ARKEOGIS V2.0. ELEMENTS D'ANALYSE DE LA MISE EN LIGNE DE BASES MULTILINGUES SUR FOND CARTOGRAPHIQUE: FONCTIONNALITÉS, APPORTS ET LIMITES

### 1. Introduction

Les difficultés liées à l'étude archéologique d'une région frontalière ont déjà fait l'objet d'une présentation dans cette même revue (Bernard 2012); la présente contribution s'attachera donc à décrire avec un premier recul l'intérêt de mettre en commun et en ligne des bases "vivantes" comme "mortes" à un niveau régional en l'état de notre projet.

Nous présenterons donc ici les finalités de notre projet, ses fonctionnalités et ses limites, ainsi que quelques cartes à titre d'exemple.

### 2. Les fonctionnalités

Pour commencer, rappelons en quelques lignes le principe et les fonctionnalités du projet: il s'agit d'un web-SIA (Système d'Informations Archéologique en ligne) développé dans le cadre d'un projet INTERREG à destination de la communauté scientifique travaillant autour de la vallée du Rhin, entre Vosges et Forêt-Noire. La diffusion des résultats auprès du public s'opérera sous forme de cartes. Le programme bénéficie de quelques années de recul, dans la mesure où une version bêta nous a permis de produire un cahier des charges précis, en bénéficiant de l'expertise des collègues archéologues dont les connaissances en informatique sont limitées, comme de celle des professionnels du SIG.

Dans le cadre de ce nouveau développement *from scratch*, nous avons privilégié l'API Google au niveau du fond cartographique et développé les modules pour l'interface, les requêtes et l'importation des bases de données au sein du programme. Les icônes sont générées à la volée automatiquement, afin d'alléger le logiciel, seules les périodes et l'état de la recherche sont des constantes au niveau de l'affichage. Chaque chercheur peut ensuite exporter les requêtes qu'il estime pertinentes au format .csv pour les réimporter dans son SIG favori ou directement dans un logiciel de dessin vectoriel géoréférencé pour produire des cartes publiables.

L'intégralité de l'interface est bilingue français/allemand, ce qui était évidemment l'une des contraintes de la région d'étude. Ceci a pris plus de temps que prévu initialement, les traducteurs généraux comme spécialisés en archéologie de l'équipe ayant eu des difficultés à traduire les éléments techniques ou légaux, ainsi que certains jargons précis au niveau des descripteurs. La mise

en place d'un bouton "contact" permettant de pointer les dysfonctionnements et les erreurs de traductions se révèle ici un investissement judicieux.

Les différents tests effectués sur les différents ordinateurs utilisés par les opérateurs de la vallée du Rhin, PC et Macintosh, de toutes générations machines publiques et privées, systèmes d'exploitation et navigateurs se sont révélés satisfaisants, bien que Mozilla Firefox soit le navigateur le plus stable pour l'application. Les tests sur des systèmes embarqués (palm, tablette) donnent satisfaction, bien que certains boutons deviennent petits. Ce n'est cependant pas la vocation première du logiciel.

Une fois authentifié, l'utilisateur se retrouve avec un onglet de requêtage sur le fond de carte relief de Google, centré sur la vallée du Rhin. La carte se manipule comme dans Googlemaps, ce qui est important pour les utilisateurs les moins expérimentés, les choix de carte ont été limités à Plan et Relief, ainsi qu'aux photographies satellitaires qui permettent de plus de supprimer les informations de légende. L'opportunité de rajouter d'autres fonds de cartes et des outils correspondant à la couche dessin que l'on retrouve sur la plupart des SIG a été mise de côté pour l'instant. En effet, même sur des logiciels vendus comme professionnels les outils de dessin sont trop souvent décevants. Encore une fois, la facilité d'exportation et de réimportation des points permet aux chercheurs de créer eux-mêmes les cartes dont ils ont besoin, sur le fond de carte à l'échelle qui les intéresse. Ce qui allège encore l'application en évitant d'avoir à charger trop de dalles cartographiques.

Sur ce fond de carte, l'utilisateur a accès à une interface lui permettant d'accéder à différentes bases de données et de les requêter en fonction de la période et de ses sujets de recherches. Trois types de bases sont disponibles, des bases inventaires (PATRIARCHE, ADAB) qui recensent l'intégralité des sites archéologiques connus dans les Services Régionaux de l'Archéologie alsaciens et badois; des bases de géographes, listant l'existence de travaux effectués sur les sols ou le paléoenvironnement et des bases de chercheurs ou d'étudiants confirmés (Master et Doctorats) en archéologie et en géographie, Français et Allemands. Ces bases sont en cours d'alimentation en ce qui concerne les inventaires et quelques bases de chercheurs, mais la plupart sont figées et ArkeoGIS ([www.arkeogis.org](http://www.arkeogis.org)) permet de les mettre en valeur.

En sélectionnant une ou plusieurs de ces bases, le chercheur a donc en quelques clics accès aux sites recensés sur les deux rives du fleuve, dans la langue de son choix et dans plusieurs types de bases.

La périodisation est évidemment un des éléments de toute première importance pour les archéologues, elle a donné lieu à de nombreux débats, les systèmes de chronologie relatives étant différents de part et d'autre du Rhin en partie, et les datations absolues par trop complexes à obtenir sur les périodisations fines. Nous avons effectivement choisi de pousser au maximum les possibilités de la chronologie relative, en utilisant un système de datation en

arborescence de type “parents/enfants”. De cette manière, un site de la période de la Guerre des Gaules sera daté de La Tène D2a, enfant de La Tène D2, période de La Tène D à l’âge du Fer. Ces quatre niveaux de requête s’avèrent intéressants, avec la possibilité de choisir tout ou partie des indéterminés pour chacune des périodes et de rajouter ou pas les sites connus de chronologie indéterminée (comme certaines enceintes ou tombes par exemple) ainsi que les données environnementales disponibles

Les artefacts et structures ont été organisés en quatre niveaux de requêtabilité également, mais seront décrits plus brièvement, dans la mesure où à l’usage un certain nombre s’avèrent peu efficaces et seront modifiées prochainement. L’utilisateur peut donc requêter l’immobilier (structures d’habitat, nécropoles, etc.), certains mobiliers (marqueurs spécifiques), la présence de productions anciennes, de structures agraires et l’existence de données paléo-environnementales.

Le risque lors de mises à plat de données très disparates étant un affaiblissement de la nuance de ces données subjectives par essence que sont les sites archéologiques, trois éléments ont été conservés pour différencier les sites moins bien connus. On peut ainsi choisir d’afficher ou de ne pas afficher les découvertes mal géoréférencées qui ont été placées sur le centroïde de leur commune, nuancer l’état de connaissance selon que les sites ont été fouillés, sondés ou sont juste mentionnés par la littérature ou prospectés. Enfin, un bouton “occupation” permet de distinguer les sites multiphasés de ceux qui ont une occupation unique et dont les données sont donc meilleures.

Enfin, chaque contributeur peut lors de l’import de sa base décider qu’un certain nombre de ses sites sont exceptionnels et les déterminer comme tels. L’idée est que la mise en commun de la subjectivité des chercheurs puisse permettre d’identifier des zones potentiellement plus riches que d’autres. Cette proposition qui sera à tester en fonction de critères diachroniques afin d’identifier des périodes de ruptures, pour lesquelles les tombes, habitats et mobiliers exceptionnels se déplacent dans l’espace; ou à l’inverse des moments où malgré un glissement chrono-culturel les élites ne se déplacent pas.

Pour simplifier l’utilisation, l’utilisateur a à sa disposition des outils pour archiver les requêtes qui lui conviennent. C’est la requête qui est archivée, de la sorte, si les bases ont été modifiées, la requête se fera sur les bases actualisées.

Une fois les bases, la période et les marqueurs sélectionnés, le chercheur a le choix entre afficher les résultats sous forme de tableur à l’écran, ce qui permet de voir quelles bases ont livré des résultats, quels sites sur quelles communes à quelle période ont livré quels types de mobiliers et de structures. Mais l’utilité principale est évidemment d’afficher ceci sous forme de carte. La taille des points est indexée sur l’état de la recherche, leur couleur sur la chronologie de la phase la plus récente. La forme des icônes est donc générée

à la volée et n'a pas de signification fixe. Au passage du curseur de la souris sur un site, un "popup" affiche le nom du site, la base d'origine, la période et la structure. Au clic s'ouvre un autre popup qui liste l'intégralité des données renseignées. Ce sont les commentaires et la bibliographie qui sont les champs les plus appréciés, dans la mesure où la requête a priori déjà trié l'information. Le fait d'avoir ainsi directement accès à des données bibliographiques précises est évidemment d'une grande aide pour les chercheurs qui ont ici un outil leur permettant de savoir où trouver une information très éparpillée dans le contexte rhénan – entre 3 services régionaux, un pôle archéologique interdépartemental Rhénan, deux universités et plusieurs opérateurs privés.

Enfin, l'utilisateur peut ensuite imprimer la liste des sites (correspondant à l'affichage tableur) ou alors exporter sa requête sous forme de document texte de type .csv. Ce format permet une grande souplesse d'export/import des données. Il faut noter que si chaque chercheur contributeur peut requêter et exporter ses résultats, l'export direct de chacune des bases n'a pas été mis en place. En revanche, un annuaire permet d'accéder directement aux chercheurs ayant contribué, permettant ainsi de renforcer le réseau de recherches transfrontalier interdisciplinaire de la vallée du

### 3. Les apports

Le premier intérêt de l'application est avant tout de mettre à disposition des chercheurs les données que leurs collègues sont prêts à mettre en commun. Cela permet en quelques clics de savoir quels sites sont recensés dans les Services Régionaux de l'Archéologie, leur bibliographie et éventuellement le numéro du dossier les concernant. Au-delà, cela permet de savoir quels études ont été menées sur quels sujets précis, et à quel niveau de finalisation elles ont été menées (Master, Thèse, publication, etc.). Pour les chercheurs de la vallée du Rhin, la mention de la page concernée, en plus du simple appel bibliographique est un gage de rapidité dans l'étude qui servira aussi bien aux professionnels qu'à tenir les délais désormais imposés aux thèses en Sciences Humaines. Même si le chercheur ne maîtrise pas parfaitement la langue de son voisin, le fait d'avoir accès à une nomenclature précise de l'état de la documentation permet généralement de trouver l'information cherchée, les termes de jargon étant assez rapidement maîtrisés.

Le premier effet de toute cartographie de sites archéologiques sera évidemment celui d'une représentation de l'état de la recherche. De part et d'autre du Rhin, des tracés apparaissent – TGV, autoroutes, etc. – sur lesquels les sites se concentrent. Les archéologues savent faire la part des choses, l'apport ici est celui de disposer à la fois des données françaises et allemandes sur une même carte. Il apparaît ainsi clairement qu'un déficit de sites est constaté au Nord du Bas-Rhin, vers la frontière allemande, alors que la région miroir fait

Fig. 1 – Carte des sites d’habitat des périodes de l’âge du Bronze et du Haut Moyen-Âge de la vallée du Rhin.

apparaître de nombreux sites (Fig. 1). Ces vides peuvent correspondre à un état de la recherche, mais également à la présence de forêts. Des vérifications prenant en compte la présence de paléosols, d’analyses polliniques et d’absence de sites sur des périodes multiples pourront permettre d’argumenter en infirmant ou confirmant ces propositions.

Le zoom entre analyses régionales et micro-régionales est rendu possible par la conjonction des dalles cartographiques de Google, qui permettent de se concentrer sur une emprise très limitée, alors qu’à l’inverse les tendances transfrontalières se dessinent plus clairement si l’on prend en compte des transects de massif à massif (soit une cinquantaine de kilomètres). Seule l’échelle intrasite a été délibérément laissée de côté, dans la mesure où ArkeoGIS n’a pas vocation à devenir un outil de terrain.

L’archéologue est par définition un nomade – quel que soit son poste et son profil. Dans ce cas précis, avoir accès à des bases de données et à des cartes

dans un outil dédié va lui permettre de répondre avec autrement plus de facilité aux différentes missions qui peuvent lui incomber, depuis la prescription en passant par le diagnostic, la fouille ou l'interprétation. En effet, en amont de travaux, le fait de disposer de cartes interactives, rend plus aisé la vérification de sites déjà connus, et c'est encore plus vrai lorsque les zones étudiées sont transfrontalières. Du coup, en quelques "clics" le prescripteur peut vérifier l'existence de sites à proximité ou dans la continuité de la zone envisagée. Une fois sur le terrain, que ce soit lors d'un diagnostic archéologique ou d'une fouille, en cas de doute ou de questionnements sur la possible présence de sites contemporains ou antérieurs à la prescription, une simple consultation sur Internet permet de vérifier si des travaux ont été effectuée et par qui -ce qui peut permettre d'en télécharger au moins le résumé, via DOLIA par exemple (<http://dolia.inrap.fr/>). L'outil sert également à vérifier l'existence d'analyses paléoenvironnementales ou de "logs" dans les alentours du site.

C'est surtout l'aspect diachronique qui est remarquable, le meilleur chercheur, le plus au point sur la bibliographie internationale concernant sa période sera nécessairement moins efficace sur les périodes antérieures et postérieures à sa recherche. Or grâce à ArkeoGIS, il devient possible de vérifier le comportement des sites et de leurs terroirs à une échelle de temps beaucoup plus large qu'auparavant, et une fois de plus avec une facilité et une rapidité surprenante pour qui a pu être habitué à errer de bibliothèque en bibliothèque de part et d'autre de frontières afin de tester une simple hypothèse de perdurance ou d'abandon de sites dans une région pour peu qu'elle soit frontalière.

L'affichage systématique des inventaires existants produit des effets secondaires très intéressants, il est ainsi possible par exemple de constater que les sites de l'âge du Bronze sont concentrés en vallée du Rhin sur une étroite bande de piémont et dans certains *rieds*, alors qu'à d'autres endroits on marche sur des tombes mérovingiennes: ce sont très probablement des effets de l'érosion et du recouvrement qui apparaissent ici -une fois limité les effets d'état de la recherche. La coopération avec les collègues Géographes permettra à l'avenir de mutualiser un certain nombre de chantiers afin de savoir comment comprendre ces phénomènes paléoenvironnementaux. Dans tous les cas, l'impact anthropique par période est révélé par la densité des sites, et le fait de mettre à la disposition des chercheurs une cartographie des analyses déjà effectuées permettra de mieux cibler les études qui restent à mener et de retrouver des analyses qui ont pu être menées et oubliées depuis leur création.

L'outil se révèle aussi très riche pour la production de synthèses régionales transfrontalières et de cartes "exhaustives", en tout cas c'est certainement le meilleur outil pour tendre vers cet état de la recherche. Les cartes qui seront produites en 2014, après intégration des bases disponibles dans la vallée du

Rhin, servent à la publication d'un atlas régional en ligne déjà existant pour les périodes postérieures à l'an mil (atlas historique d'Alsace du CRESAT de l'UHA: <http://www.atlas.historique.alsace.uha.fr/>).

Un autre élément tout à fait intéressant est la vérification des bases les unes par rapport aux autres et en fonction des cartes actuelles. En effet, de nombreux chercheurs disposent de bases déjà anciennes pour lesquelles les sites ont été calés manuellement à l'aide de transparents sur des cartes routières. La précision de ces bases au final est forcément inférieure à celle que pourra obtenir un chercheur aujourd'hui avec un GPS. Mais en affichant ces deux types bases sur une même carte, on peut retrouver facilement les sites et grâce à la fonction d'export en récupérer les coordonnées. Le cas échéant, il est très facile de vérifier via Google satellite que le site est au bon endroit. ArkeoGIS servira aussi dans certains cas à fusionner des points et à proposer l'existence de sites plus importants: plusieurs épandages de mobiliers, diagnostics archéologiques et sondages donnant des résultats positifs et cohérents peuvent être la preuve de l'existence d'un important site de plaine, de même plusieurs tombes isolées peuvent correspondre à une nécropole.

Enfin, pour les bases actuellement alimentées, celles de chercheurs en activité comme celle de services d'inventaire, ArkeoGIS permet d'implémenter facilement sa base en extrayant les sites ou les informations supplémentaires concernant les sites que chaque chercheur ayant mutualisé ses travaux a produit.

#### 4. Les limites

En l'état de notre projet, les limitations de l'application sont surtout liées à l'état de la recherche (création de nouvelles bases, implémentation de bases anciennes, inventaires à informatiser, etc.), mais l'application permet de gérer tous les contenus qui pourraient être proposés à l'équipe.

Au niveau logiciel, la solution choisie est simple et légère et semble fonctionner sur tous les types de supports connectés. Concernant l'hébergement des bases et du logiciel, l'hébergement par le TGE ADONIS garantit une conservation optimale des données, une puissance de calcul largement suffisante ainsi que la mise en relation avec les autres bases et solutions logicielles existantes. Une interconnexion avec le site CARGOS (<http://cargos.tge-adonis.fr/>) est à l'étude, elle permettra de disposer de davantage de données géographiques.

La mise en place d'ArkeoGIS à partir d'un cahier des charges intuitif rédigé en fonction des besoins des utilisateurs permet d'être facilement utilisable par les partenaires du projet. Les développements futurs de l'architecture de la base et de ses nomenclatures devront être mis aux normes INSPIRE afin de permettre une meilleure interopérabilité de l'outil. Encore une fois, la simplicité d'exportation devrait permettre ces aménagements sans trop de complexité au niveau de la mise en œuvre.

Fig. 2 – Carte des découvertes en relation avec des circulations (éléments de voies romaines, aménagements de pentes, gués, etc.).

Le logiciel et la mise en commun des données relèvent d'une démarche coopérative et libre, ainsi chaque contributeur qui met à disposition ses données à accès à l'intégralité des bases. Les collègues Géographes par exemple disposent désormais d'un outil cartographique qui leur permet de visualiser rapidement les implantations anthropiques holocènes, ce qui leur permet de cibler leurs terrains d'étude en fonction de ces dernières. Des travaux communs sont envisagés afin de permettre de mutualiser des études de terrain à partir de zones identifiées sur ArkeoGIS.

Le code source est disponible sur GITHUB, ce qui peut permettre à une équipe désirant utiliser l'outil sur une autre zone transfrontalière de gagner pas mal de temps en développement. Nous espérons que l'outil suscitera l'intérêt de collègues ou de développeurs qui pourraient investir du temps à développer et perfectionner l'outil.

Fig. 3 – Carte des tumuli de l'âge du Bronze et du Fer superposée à celle des éléments de circulation.

Deux cartes enfin pour présenter le fonctionnement d'ArkeoGIS, la première (Fig. 2) recense tous les sites en relation avec des circulations (éléments de voies romaines, aménagements de pentes, gués, etc.) en provenance de bases inventaires et de recherche. Cette carte permet de lire très facilement l'état de la recherche et de proposer des cheminements de part et d'autre du fleuve dans la vallée et vers les massifs. Les points rouges correspondent à la période gallo-romaine, les points noirs aux périodes médiévales, il est particulièrement intéressant de constater ici l'évolution de certains de ces axes selon les périodes.

Sur la seconde carte (Fig. 3) ont été rajoutés les tumuli de l'âge du Bronze et de l'âge du Fer recensés dans la région. On sait en effet que ces derniers étaient placés le long des voies. La mise en commun de ces informations permet donc de disposer d'une proposition de réseau particulièrement intéressante dans ses continuités et ses ruptures.

## 5. Conclusion

En guise de conclusion, l'importance de la facilité de lecture diachronique et transfrontalière de la zone d'étude a déjà été évoquée, mais il me semble important d'insister sur le fait que des études ou des analyses qui auraient pris des mois voire des années peuvent maintenant être réalisées en quelques secondes, à charge ensuite pour le chercheur de trouver ses données dans le détail, mais grâce à des informations fiables et précises. Pour les recherches, l'intérêt majeur réside aussi dans l'interdisciplinarité: disposer de données cartographiées en provenance de disciplines connexes à la sienne – on a évoqué la géographie, mais on peut tout à fait envisager d'intégrer l'épigraphie, la numismatique, etc. – permet de vérifier et d'implémenter ici aussi les thématiques prises en compte par chaque chercheur, en dépassant les frontières bien plus facilement que jusqu'alors.

Loup Bernard

UMR 7044

Étude des civilisations de l'Antiquité: de la Préhistoire à Byzance  
MISHA – Maison Interuniversitaire des Sciences de l'Homme – Alsace

Toutes les cartes ont été produites grâce à ArkeoGIS, elles sont générées par la mise en commun des bases inventaires du Service Régional de l'Archéologie DRAC Alsace (PATRIARCHE), du Landesamt für Denkmalpflege Baden (ADAB), des bases de thèse de Loup Bernard, Clément Feliu, d'une base de recherche de Marina Lasserre, de la base de Master 2 de Rémy Wassong et de l'ouvrage de Gerhard Hofmann, *Spuren Früher Zeiten, Funde und Fundstätten im Landkreis Rastatt*, Kreisarchiv Rastatt, 2007; ainsi que de la base ALISA du Laboratoire Image, Ville et Environnement (LIVE) - EA 4382 - ERL 7230 mise à disposition par Martine Trautmann.

## BIBLIOGRAPHIE

Bernard L. 2012, *ArkeoGIS, Développement d'un websig transfrontalier: contraintes et premiers résultats*, in F. Giligny *et al.* (eds.), *Actes des 2<sup>èmes</sup> Journées d'Informatique et Archéologie (Paris 2010) – JIAP 2010*, «Archeologia e Calcolatori», Suppl. 3, 153-160.

## ABSTRACT

Two years after the presentation of the first version of ArkeoGIS during the JIAP meeting, version 2 is now functional. It allows French and German archaeologists working in the Rhine Valley to have an online tool, free, easy to approach and searchable on four levels. ArkeoGIS combines on a single map the available archaeological information on several thousand deposits located on both sides of the river. The chronological range takes into account the sites from the Bronze Age to the Middle Ages. The program, which is funded by INTERREG IVa Upper Rhine, is ongoing and provides the archaeological community with the source code of the software, allowing other researchers dealing with the study of border territories to adapt this tool to their needs.

## LES APPORTS D'UN MODÈLE CONCEPTUEL DE DONNÉES À L'ÉTUDE DES COMPOSANTES URBAINES D'OSTIE

L'étude des villes romaines se fonde traditionnellement sur des catégories architecturales définies par les philologues et les archéologues avant la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle. Depuis, les progrès des techniques numériques, et plus particulièrement des systèmes d'informations géographiques, ont introduit le développement d'un nouveau type de formalisme parfois inconciliable avec celui développé et utilisé précédemment dans les études archéologiques et d'histoire urbaine. Dans le cadre d'une étude des boutiques de la ville d'Ostie du I<sup>er</sup> au IV<sup>e</sup> s. de notre ère, un modèle conceptuel de données a été élaboré avec le formalisme entité-relation de la méthode Merise. Son emploi impose une relecture de certains vestiges.

Plutôt qu'une approche historiographique ou strictement morphologique, cet article se propose d'appréhender les questions qu'implique l'utilisation d'un modèle conceptuel de données pour l'étude des composantes urbaines d'une ville antique. Sans proposer ici un modèle transposable à d'autres sites et problématiques, il s'agit avant tout d'exposer notre démarche, les problèmes rencontrés et les solutions retenues. Nous étudierons dans un premier temps le processus historiographique présidant à l'élaboration et à la diffusion des catégories architecturales à Ostie, avant d'aborder la conception du modèle conceptuel de données employé dans notre étude, pour enfin mesurer les apports de ce dernier à l'étude des composantes urbaines d'Ostie.

### 1. L'élaboration et la diffusion des catégories architecturales

L'interprétation traditionnelle des composantes urbaines des villes romaines découle d'un long processus historiographique, se trouvant à la croisée de l'archéologie et de la philologie. Trois étapes majeures se distinguent dans la constitution des catégories architecturales sur lesquelles se fonde une grande partie de nos connaissances du phénomène urbain de cette époque.

Dans un premier temps, à partir du XVII<sup>e</sup> siècle, un grand chantier lexicographique est ouvert par les savants qui mettent en place des lexiques et dictionnaires latins, comme l'*Etymologicon* de Gerardi Joannis Vossius publié en 1662, ou le *Lexicon Totius Latinitatis* d'Edigio Forcellini en 1771. Dans le cadre de ces entreprises sémantiques et étymologiques, ces érudits ont tenté de définir des termes architecturaux latins en les associant à des caractéristiques physiques mentionnées dans les sources écrites.

Dans un deuxième temps, entre la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et plus particulièrement au début du XX<sup>e</sup> siècle à Ostie, les archéologues ont employé des

mots latins tels qu'ils furent définis précédemment pour désigner des vestiges archéologiques précis. La réalité archéologique de Pompéi ou d'Ostie est alors décomposée en catégories architecturales désignées par des mots latins: *domus*, *insulae*, *tabernae*, *horrea*, etc. La substitution de mots latins au vocabulaire de l'architecture moderne pose problème dès lors qu'elle a une incidence importante sur l'interprétation des vestiges. Par exemple, A. Mau utilise le terme «*pergula*» pour désigner une mezzanine pourvue d'une loggia à Pompéi (Mau 1887, 215). Or, dans un de ses ouvrages, Plaute décrivait une *pergula* comme un lieu de prostitution (Plaute, *Pseudolus*, 215: *Si mihi non iam huc culleis oleum deportatum erit, te ipsam culleo ego cras faciam ut deportere in pergulam. Ibi tibi adeo lectus dabitur, ubi tu hau somnum capias sed ubi usque ad languorem ... tenes quo se haec tendant quae loquor*). En croisant les sources, A. Mau attribue la fonction évoquée par Plaute aux loggias de Pompéi en indiquant que ces dernières étaient employées par les proxénètes pour exhiber aux passants des candidates à l'amour tarifé (Mau 1887, 214).

Depuis les années 1980, s'est amorcé selon R. Hanoune «le temps des réajustements» (Hanoune 1984). Les archéologues et historiens tendent alors à questionner le lien établi entre la terminologie latine et les vestiges archéologiques. Différentes démarches sont adoptées. Il s'agit d'une part d'études philologiques visant à la relecture critique du sens attribué aux mots latins, débouchant parfois sur leur redéfinition. Ainsi, J. Dubouloz a-t-il récemment démontré que le mot *insula* ne désignait pas une catégorie spécifique d'édifice, mais un type d'exploitation urbaine dont la perception du loyer incombait à un *institor* (Dubouloz 2011, 577). Il s'agit d'autre part de retracer le cheminement historiographique menant vers l'association d'un terme latin à un type d'édifice donné. Cette démarche permet de déconstruire les arguments logiques sur lesquels reposent la mise en place de certains types architecturaux, comme la *domus* (Guilhembet 2004). Enfin, certains spécialistes ont confronté les contenus sémantiques des mots aux vestiges mêmes, comme l'a fait N. Monteix au sujet des termes latins *caupona*, *popina* et *thermopolium*, traditionnellement employés pour désigner des types de commerces alimentaires (Monteix 2004).

Ces travaux ont suscité des positions contrastées. Certains archéologues, comme P. Allison, plaident pour un simple rejet de la terminologie latine dans les études archéologiques modernes (Allison 2001, 186-187). Quelques spécialistes préfèrent conserver l'usage des mots latins par simple convention, tout en écartant le croisement des sources. Enfin, d'autres spécialistes pensent que l'interprétation des vestiges ne peut faire l'économie des sources textuelles (Guilhembet 2004, 103-104).

Ce processus historiographique a une répercussion importante sur notre approche des espaces urbains antiques. La carte d'Ostie publiée en 1953 dans le premier volume des *Scavi di Ostia* est incontournable du fait de son

niveau de détail élevé, mais aussi car elle représente des zones actuellement inaccessibles ou détruites (Calza *et al.* 1953). L'emploi de termes latins dans les toponymes des édifices (comme la *domus della Fortuna Annonaria* V, ii, 8, les *Horrea di Hortensius* V, xii, 1, la *taberna dei pescivendoli* IV, v, 1 ou encore la *schola del Traiano* IV, v, 14) fait de cette carte un vecteur de diffusion important des catégories architecturales élaborées entre la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et la moitié du XX<sup>e</sup> siècle.

En outre, chaque édifice possède un triple numéro de référence correspondant au numéro de sa région, de l'îlot dans lequel il se situe et enfin de son numéro au sein de ce dernier. Il s'agit donc d'un système hiérarchisé où les édifices s'inscrivent dans plusieurs unités construites plus vastes, à la manière de poupées gigognes.

La carte de G. Becatti est une source d'informations très précieuse. Toutefois son formalisme repose à la fois sur une structure hiérarchisée des entités et sur l'emploi d'une terminologie latine. Il s'agit donc d'un modèle dans lequel les informations sont classées selon une structure préétablie engageant l'interprétation fonctionnelle d'un grand nombre d'édifices.

## 2. Les principes et apports possibles du modèle conceptuel de données

Au milieu des années 1970, la multiplication des domaines de gestion informatisés a imposé de revoir leur approche jusqu'alors centrée sur les programmes de traitement. La vision s'est déportée sur les informations traitées, leur définition et relations. Le modèle *entity-relationship* formalisé et défini par Peter Chen aux Etats-Unis (Chen 1976) est développé en France par Arnold Rochfeld et Henri Tardieu qui en feront la méthode Merise en 1978-1979 (Tardieu, Rochfeld, Colletti 1983, 13).

Ce modèle postule que tout domaine de connaissance borné, peut être décrit par un ensemble d'objets-types organisés. Il définit dans un premier temps l'objet-type comme un objet concret ou abstrait ayant une existence reconnaissable, susceptible de constituer une collection et dont toutes les réalisations de la collection peuvent se décrire par un ensemble stable d'attributs. Les objets-types sont répartis en deux catégories distinctes: les entités qui ont une existence propre, les relations qui ne peuvent exister qu'en liaison avec une ou plusieurs entités (Tardieu, Rochfeld, Colletti 1983, 127). L'ensemble de ces entités et relations est relié par un graphe de liens. Chaque lien est porteur de la cardinalité maximale et minimale de ce lien entre l'entité et la relation (Tardieu, Rochfeld, Colletti 1983, 131). L'ensemble entités, relations, graphe des liens constitue le modèle conceptuel de données.

L'emploi d'un tel système permet de définir autrement les composantes urbaines, indépendamment des sources écrites et de leurs interprétations historiques. Au contraire, elles se définissent en fonction de la place qu'elles

occupent dans le modèle conceptuel de données et par rapport aux autres entités et relations. Une telle démarche impose de mener une réflexion sur le statut des composantes urbaines observées à Ostie et de leurs relations tant physiques que sémantiques.

### 3. Une relecture imposée par le modèle conceptuel de données

L'utilisation d'un modèle conceptuel de données entité-relation se fonde sur un formalisme étranger à celui des catégories architecturales élaborées au XIX<sup>e</sup> et au XX<sup>e</sup> siècle exprimées dans la carte d'Ostie conçue par G. Becatti. De ce fait, l'élaboration du modèle conceptuel de données conduit à une relecture des vestiges et des cartes afin de mettre en place une base de données intégrant des composantes urbaines stables et opérantes (Fig. 1). Afin de dissocier dans la mesure du possible la description de la réalité archéologique et son interprétation, il faut recourir à des unités non hiérarchisées sans préjuger de leur fonction.

Dans le cadre de notre étude, l'unité d'analyse centrale est la boutique (Gauthiez 2003, 424). Son identification se fonde en grande partie sur son mode de clôture caractéristique se traduisant par la présence d'un seuil à rainure longitudinale (Adam 1989, 346 et Bouet 1994, 29).

Les boutiques ont été systématiquement construites au sein d'édifices plus vastes (immeubles, maisons, thermes, etc.) qu'il importe d'identifier en tant que tels. Ces édifices sont désignés dans la carte de G. Becatti par un identifiant composé de trois numéros. Le troisième de ces indices pose d'importants problèmes dans la mesure où il correspond à une réalité changeante et ne peut donc être employé tel quel dans le cadre du formalisme d'un modèle conceptuel de données. Le complexe de Neptune constitue l'un des exemples les plus éloquents des problèmes que pose la constitution d'un inventaire à partir de la carte de G. Becatti (Fig. 2). En se fondant sur une étude de la maçonnerie, des chaînages, ainsi que sur les timbres de briques, l'archéologue J. Delaine a mis en évidence que ce complexe a été édifié lors d'un seul et même chantier de construction datant de 130-138 ap. J.-C. (Delaine 2002, 58-60). L'inscription CIL XIV, 98 indique en outre que sa construction est très probablement une initiative des empereurs Hadrien et Antonin le Pieux.

L'unité de cet ensemble n'est pas traduite par la carte de G. Becatti qui distingue plusieurs composantes: *l'edificio* II, III, 1-5, le *Portico di Nettuno* (II, iv, 1), les *Terme di Nettuno* (II, iv, 2-5), la *Caupona di Fortunato* (II, vi, 1) le *ninfeo* (II, vi, 2); *l'insula dell'Ercole Bambino* (II, vi, 3-4), la *Casa del Soffito Dipinto* (II, vi, 5-6) et le *Caseggiato delle Fornaci* (II, vi, 7). Cette classification est très incohérente dans la mesure où le troisième numéro correspond tantôt à des unités topologiques telles que *l'insula dell'Ercole bambino* (II, vi, 3), à une rangée de boutiques (II, iv, 5), ou à une boutique spécifique dont

Fig. 1 – Le modèle conceptuel de données.

la fonction est identifiée, comme le commerce alimentaire de la *caupona di Fortunato* (II, vi, 1). Enfin, un numéro spécifique (II, iv, 2) est attribué à un empiètement de trois boutiques sur le portique datant de l'Antiquité Tardive (Gering 2004, 320-321). Ainsi, ce troisième numéro désigne parfois une unité fonctionnelle donnée (ex: *domus di Giove e Ganimede* I, iv, 2), une unité de chantier (ex: le *Ninfeo* II, vi, 2), ou encore une parcelle (ex: *Caseggiato* I, xiii, 5). Le formalisme proposé par la carte de G. Becatti ne répond pas à la cohérence nécessaire à l'élaboration d'un modèle conceptuel de données. Pour cette raison, nous choisissons d'étudier les composantes urbaines d'Ostie comme des unités de conception définies par B. Gauthiez comme une: «forme de l'œuvre architecturale ou urbanistique, que l'on peut individualiser par ses régularités, ses dispositions ou sa composition urbaine» (Gauthiez 2003, 111). Ainsi, cette définition permet l'étude d'une collection cohérente d'édifices et permet d'éviter toute hiérarchisation préétablie (Fig. 3).

Les portiques sont considérés comme des édifices à part entière sur la carte de G. Becatti. Cela pose problème dès lors qu'un portique se développe le long de différents édifices. Ainsi, le portique occupant la façade méridionale du complexe de Neptune, le long du *Decumanus* est divisé sur la carte en trois entités correspondant aux trois îlots (II, iii; II, iv et II, vi) figurant sur

Fig. 2 - Le complexe de Neptune d'après la carte de G. Becatti.

la carte. Ceci a pour effet de rompre l'unité architecturale du portique alors qu'il s'agit d'un espace unitaire et cohérent.

En outre, l'observation des vestiges archéologiques mène à constater que les portiques d'Ostie sont systématiquement attachés à des édifices plus vastes. Ainsi les trouve-t-on en façade d'immeubles, de thermes, etc. Ces remarques mènent donc à considérer, dans le modèle conceptuel de données, les portiques non comme des entités, mais comme des relations dans la mesure où leur existence est conditionnée par celle d'un édifice plus vaste.

Dans la carte de G. Becatti, certains toponymes préjugent de la fonction d'un espace, comme le *Sede degli Augustali* (V, vii, 1-2) qui est nommé d'après la fonction de siège du collège des *augustales* que lui a attribué G.

Fig. 3 – Le complexe de Neptune d’après le modèle conceptuel de données.

Calza. L’archéologue M.A. Laird a récemment critiqué cette identification: selon elle, il ne s’agissait nullement d’un siège associatif, mais d’une demeure luxueuse (Laird 2000). Il en va de même pour les activités artisanales. Ainsi, l’identification traditionnelle des boutiques IV, v, 1 comme des poissonneries est traduite dans son toponyme: les *taberne dei pescivendoli*. Cette identification est fortement discutable dans la mesure où elle repose uniquement sur la présence d’un bassin maçonné et d’un dauphin représenté sur une mosaïque de pavement (De Ruyt 1983, 118; Meiggs 1997, 267). Afin de ne pas confondre l’identification d’une entité construite et celle de sa fonction, il apparaît nécessaire de constituer, dans le modèle conceptuel de données, une entité “fonction” permettant de caractériser les unités construites. Les structures artisanales (bassins maçonnés, comptoirs, fours, etc.), ainsi que le

mobilier se trouvant dans les boutiques ont le statut d'entités; elles sont reliées à l'entité "fonction" lorsqu'elles peuvent être rattachés à une activité donnée (commerce alimentaire, boulangerie, foulerie, teinturerie, etc.). L'identification d'unités de conception au sein des vestiges s'opère donc indépendamment de leur interprétation fonctionnelle. Cette séparation permet également de rattacher des activités commerciales ou artisanales attestées dans les sources iconographiques ou épigraphiques d'Ostie à l'entité "fonction".

Le modèle conceptuel de données permet de mettre en œuvre une description dynamique de notre domaine de recherche à même de gérer, pour chaque entité, les méconnaissances, incertitudes ou la variété des hypothèses que l'on peut faire pour chacune d'elle. Il est ainsi possible de prendre en compte les utilisations successives de certains équipements:

- Le modèle conceptuel de données inclut une entité "pièce annexe", correspondant aux arrière-boutiques ou entresols de certaines boutiques servant de lieu de travail ou de logement.
- Enfin, une entité "tronçon de rue" a été créée afin d'être à même de rattacher une boutique ou une unité construite à la voirie afin d'étudier les questions d'accessibilité et de circulation.

#### 4. Conclusion

Classiquement employé pour l'élaboration d'une base de données, le modèle conceptuel de données nous a surtout conduits à une réflexion approfondie et une explicitation sur les objets (concrets et abstraits) de notre domaine d'étude et surtout sur les relations qu'ils entretiennent entre eux. Cette approche nous a permis de revisiter le statut des composantes urbaines que décrivent ces objets et de les confronter à leur définition issues de l'historiographie.

André Del

Espace virtuel de conception en architecture et urbanisme (EVCAU)  
École d'architecture de Paris Val-de-Seine

Julien Schoevaert

UMR 8210 ANHIMA

Anthropologie et Histoire des Mondes Antiques  
Université Paris 7 Diderot

#### BIBLIOGRAPHIE

- Adam J.-P. 1989, *La Construction romaine: matériaux et techniques*, Paris, Picard.  
Allison P. 2001, *Using the material and written sources: turn of the millennium approaches to Roman domestic space*, «American Journal of Archaeology», 105, 181-208.  
Bouet A. 1994, *Seuils de pierre en Gaule méridionale*, «Revue archéologique de Narbonnaise», 27-28, 9-40.

- Calza G., Becatti G., Gismondi I., De Angelis D'Ossat G., Bloch H. 1953, *Scavi di Ostia, I, Topografia generale*, Roma, Libreria dello Stato.
- Chen P. 1976, *The entity-relationship model: toward a unified view of data*, «ACM Transactions on Database Systems», 1, n. 1, 9-36.
- De Laine J. 2002, *Building activity in Ostia in the second century AD*, in C. Bruun, A.G. Zevi (eds.), *Ostia e Portus nelle loro relazioni con Roma*, Acta Instituti Romani Finlandiae, 27, 41-102.
- De Ruyt C. 1983, *Macellum: marché alimentaire des Romains*, Louvain-la-Neuve, Institut supérieur d'archéologie et d'histoire de l'art.
- Dubouloz J. 2011, *La propriété immobilière à Rome et en Italie, I<sup>er</sup>-V<sup>e</sup> siècles: organisation et transmission des praedia urbana*, Rome, École française de Rome.
- Gauthiez B. 2003, *Espace urbain: vocabulaire et morphologie*, Paris, Monum, Éd. du patrimoine.
- Gauthiez B. 2004, *Des unités pertinentes pour mesurer la ville concrète*, «Histoire & mesure», 19, 3/4, 295-316.
- Gering A. 2004, *Plätze und Strassensperren an Promenaden. Zum Funktionswandel Ostias in der Spätantike*, «Römische Mitteilungen», 111, 299-382.
- Guilhemet J-P. 2007, *Normes romaines et résidences pompéiennes: remarques historiographiques*, in L. Bernabei, *Contributi di Archeologia Vesuviana*, 3, Roma, L'Erma di Bretschneider, 93-107.
- Hanoune R. 1984, *La maison romaine. Nouveautés*, in J. Balty (ed.), *Apamée de Syrie. Bilan des recherches archéologiques, 1973-1979. Aspects de l'architecture domestique d'Apamée. Actes du Colloque (Bruxelles 1980)*, Bruxelles, Centre belge de recherches archéologiques à Apamée de Syrie, 431-446.
- Laird M.L. 2000, *Reconsidering the So-called 'Sede degli Augustali' at Ostia*, *Memoirs of the American Academy in Rome*, 45, University of Michigan Press, 41-84.
- Mau A. 1887, *Sul significato della parola pergula nell'architettura antica*, «Römische Mitteilungen», 2, 1887, 214-220.
- Meiggs R. 1997, *Roman Ostia*, Oxford, Clarendon Press.
- Monteix N. 2004, *Caupona, popinae et «thermopolia», de la norme littéraire et historiographique à la réalité pompéienne*, in L. Bernabei, *Contributi di archeologia vesuviana*, 3, Roma, L'Erma di Bretschneider, 115-126.
- Saligny L., Rodier X., Galinié, H. 2004, *Entités fonctionnelles, entités spatiales et dynamique urbaine dans la longue durée*, «Histoire & mesure», 19, 3/4, 223-242.
- Tardieu H., Rochfeld A., Coletti R. 1983, *La méthode MERISE, Principes et outils*, Paris, Les Éditions d'Organisation.

## ABSTRACT

The study of Roman cities relies on architectural typologies created before the middle of the 20<sup>th</sup> century. The recent use of computer and especially of GIS in archaeological studies requires new approaches and the definition of efficient typologies. The study of the shops of Ostia between the 1<sup>st</sup> and the 4<sup>th</sup> c. AD is based on the concept of an entity-relationship model that requires redefinition of some urban components. Through a few case-studies this paper aims to describe the contribution of an entity-relationship model to the study of Roman cities.

## DE LA TABLETTE PC À LA CARTOGRAPHIE DE TERRAIN: EXEMPLE DE MÉTHODOLOGIE SUR LE CHANTIER D'ARCHÉOLOGIE PRÉVENTIVE DE NOYON (OISE)

### 1. Introduction

La fouille de Noyon fait partie des opérations réalisées par l'Inrap en préalable à la construction du futur canal Seine-Nord Europe. Elle concerne la *pars rustica* d'une importante *villa* gallo-romaine située dans les faubourgs, à l'Ouest de la ville de Noyon.

La superficie de la fouille, avoisinant les 6 hectares, la nature du site, stratifié sur 1,35 hectares, la densité des vestiges (2600 faits, 25 bâtiments) et les contraintes de temps inhérentes à l'archéologie préventive ont motivé la mise en place d'un système d'enregistrement informatisé dans le but de gagner en efficacité.

La mise en place de ce système d'enregistrement a bénéficié de l'aide de la Direction scientifique et technique de l'Inrap, notamment pour son support physique, et de l'appui méthodologique du plateau technique de l'antenne Inrap dédiée au projet du canal Seine-Nord Europe.

Le chantier de Noyon s'est déroulé en deux tranches, sur une durée totale de 9 mois, avec une équipe composée de 10 à 15 agents. Le système d'enregistrement mis en place aura permis de traiter une importante masse de documentation: environ 5000 unités stratigraphiques, 270 minutes, 6000 photos; mais aussi de mobilier: 300 caisses de mobilier, 1500 isolats de petit mobilier.

### 2. L'enregistrement des données

#### 2.1 *Les tablettes durcies*

L'opération de Noyon a bénéficié de quatre tablettes durcies dans le cadre d'une expérimentation menée par la Direction scientifique et technique de l'Inrap.

Il s'agit d'ordinateurs de terrain, sur lesquels peuvent être installés un système d'exploitation et tous les programmes habituels utilisés sur un ordinateur de bureau. La principale interface d'utilisation est l'écran tactile muni d'un stylet, qui remplace la souris et permet la saisie de texte directement par reconnaissance graphique de l'écriture (Fig. 4). La spécificité de ce matériel, conçu initialement pour un usage militaire, est sa robustesse et son adéquation à des conditions de terrain difficiles (pluie, boue, poussière, froid, chocs).

Les quatre tablettes ont été utilisées pour l'enregistrement archéologique de terrain par l'ensemble de l'équipe de fouille et réparties sur les différentes zones du chantier.

## 2.2 La base de données: CADoc

Un certain nombre de conditions est requis pour l'utilisation d'une base de données, sur le site de Noyon ou ailleurs. L'utilisateur doit être familiarisé avec l'outil informatique en général. Pour mieux comprendre les logiques de fonctionnement, il est même parfois souhaitable d'avoir quelques notions rudimentaires dans la conception et l'utilisation des bases de données. Il faut bien sûr maîtriser les principes fondamentaux de l'enregistrement stratigraphique.

La base de données relationnelle employée sur le chantier de Noyon est CADoc (acronyme de "Chantier Archéologique et Documentations"). Son développement a été initié dans le cadre de la fouille préventive de Chilleurs-aux-Bois, dans le Loiret (Fournier 2010). Il s'agit d'une base de données créée en région Centre par Thomas Guillemard, se voulant accessible et simple d'utilisation.

CADoc a été conçue sur le logiciel FileMaker Pro 9 Advanced; elle fonctionne également sur les versions antérieures (v8 et v8.5) et ultérieures (v10 et v11).

Il s'agissait à l'origine d'un fichier adapté à des sites ruraux possédant une stratigraphie simple et non dense. L'objectif initial était de stocker l'ensemble des données de terrain dans un seul et même fichier et d'en permettre rapidement la consultation.

Par la suite, encouragés par la multiplication des études de cas rencontrées, les objectifs se sont multipliés. De nombreuses améliorations ont alors été apportées que ce soit au niveau de la structure ou de l'interface d'utilisation.

L'application tend à appréhender tous les cas de figures rencontrés au cours d'une intervention archéologique. Tout responsable d'opération doit pouvoir l'utiliser en fonction de ses besoins; CADoc doit être adaptée à sa façon de procéder, de travailler et elle peut être utilisée tout ou partie. Une seule condition est cependant requise: c'est l'enregistrement en unité stratigraphie. L'US est en effet le "noyau principal" de la structure de la base de données et concourt au bon fonctionnement du fichier.

Dans le cadre de l'opération de Noyon, un autre paramètre a du être pris en compte: c'est l'utilisation de CADoc directement lors de la phase terrain via tablette durcie. C'est probablement là qu'a résidé finalement la plus grosse difficulté. En plus de l'apprentissage d'un nouveau fichier/base de données, l'utilisateur a dû également s'adapter à ce nouveau support informatique, qui s'est avéré la plupart du temps être une véritable découverte.

Noyon étant le premier site où CADoc est utilisée directement sur le terrain, de nombreuses adaptations ont été réalisées sur l'interface de saisie, en fonction du format réduit de la tablette durcie. Des procédures ont également été créées, permettant d'accélérer la navigation et le suivi de l'avancement du terrain. Sur le site, le découpage en zones et secteurs a rendu difficile la gestion globale de la base. En effet, l'étendue du site et son zonage ont permis l'utilisation de quatre tablettes en simultané. Il a donc fallu séparer le fichier de base de données en quatre fichiers distincts. Cette subdivision a été répétée sur la première et la deuxième tranche de fouille. Une réunion de l'ensemble a ensuite été réalisée à l'issue de la phase terrain pour qu'il n'y ait, pour tout le site, qu'une seule base de données à traiter en post-fouille. Cela nécessite alors le concours et le suivi d'une seule personne chargée de surveiller et de contrôler l'intégrité de l'ensemble et la compatibilité entre chaque fichier avant la concaténation.

Toutes les données issues de l'opération archéologique de Noyon ont été enregistrées dans CADoc durant la phase terrain: unités stratigraphiques (Fig. 1), faits archéologiques, sondages, minutes de chantier, photos numériques (photos de terrain, photos d'objets, etc.). Le mobilier isolé ainsi que les prélèvements ont également été inventoriés dans CADoc durant la phase terrain.

CADoc intègre des processus permettant l'utilisation du logiciel "le Stratifiant" (Desachy 2008). La liaison entre CADoc et "le Stratifiant" est totalement automatisée ce qui a permis d'obtenir en temps réel des propositions de diagrammes stratigraphiques en fonction des données de terrain saisies<sup>1</sup>. Ces dernières ont donc pu être vérifiées et, le cas échéant, corrigées voire affinées directement sur le terrain.

Enfin, CADoc permet également de gérer la question de la chronologie du site (ou de l'opération en général), qu'elle soit relative ou absolue. Il permet donc de réaliser et d'ordonner la mise en séquence, phase et période du site. Cette étape est indispensable sur des chantiers à stratification dense. Ces principes ont déjà été maintes fois présentés dans de nombreuses publications (Randoïn 1987).

En post-fouille, l'utilisateur pourra donc organiser son enregistrement selon les critères et définitions stratigraphiques et chronologiques qu'il aura établi au cours de son étude.

Au final, l'opération de Noyon a permis pour la première fois l'utilisation "expérimentale" de la base de données CADoc directement sur le terrain.

<sup>1</sup> Tout comme CADoc, "le Stratifiant" est un outil aidant à l'étude. Il ne s'agit, en aucun cas, de logiciel réalisant le travail à la place de l'utilisateur, qui réduirait ce dernier à un simple "presse-bouton".

Fig. 1 – CADoc: exemple d'une fiche US.

Fig. 2 – Procédure de traitement des données géographiques.

Le bilan est plutôt positif. D'une part, le fichier a grandement évolué grâce à cette collaboration. L'interface est devenue encore plus ergonomique et, en fonction des demandes et besoins, de nouvelles procédures ont été créées.

D'autre part, les retours d'expérience des différents utilisateurs permettront par la suite de poursuivre l'évolution naturelle et le développement de la base de données.

### *2.3 Avantages et contraintes*

La mise en place d'un tel système d'enregistrement dès la phase terrain présente de nombreux avantages. Son support technique, la tablette durcie, est parfaitement adapté aux conditions d'utilisation en extérieur et notamment aux intempéries. La documentation, centralisée sur ce support technique au sein d'un même support numérique, la base de données CADoc, peut donc être vérifiée et exploitée en temps réel. La saisie directe sur le terrain permet de réduire la phase de traitement primaire de l'information en post fouille à une simple relecture et à une harmonisation des descriptions. Enfin, pour le mobilier qui ne nécessite pas de traitement primaire, cela permet un envoi direct au spécialiste.

Les inconvénients sont essentiellement de deux types. Il s'agit tout d'abord d'inconvénients matériels liés à l'autonomie des batteries, variable en fonction de l'intensité d'utilisation de la tablette, à la luminosité de l'écran, insuffisante par temps ensoleillé, ou encore à la gestion des sauvegardes (en fonction de la quantité de données enregistrées il peut s'avérer nécessaire d'effectuer plusieurs sauvegardes par jour). Il s'agit ensuite d'inconvénients "humains" liés au temps nécessaire pour s'approprier l'outil et se défaire des habitudes "papier" mais aussi au temps de saisie. On note entre autre, des difficultés pour la reconnaissance d'écriture dans le cas de l'utilisation d'une même tablette par plusieurs personnes.

Le principal inconvénient reste la scission du fichier de base de données en plusieurs fichiers distincts afin de pouvoir utiliser plusieurs tablettes durcies en même temps. La possibilité de disposer d'un serveur de bases de données auquel les tablettes seraient connectées en mode non-filaire permettrait à l'avenir de résoudre le problème et de pouvoir utiliser une seule base de données depuis chacune des tablettes et de ne pas avoir à sauvegarder le soir les données enregistrées sur toutes les tablettes. Par ailleurs, le fait de n'avoir qu'une seule base de données faciliterait grandement les exports de tables régulièrement réalisés afin d'actualiser les liaisons avec les données spatiales.

## **3. La cartographie en temps réel**

### *3.1 Principe, méthodologie et outils*

L'ampleur de l'opération de Noyon, par sa durée, la surface décapée et le nombre de faits mis au jour, a motivé le recours, pendant la phase de terrain, à une cartographie plus aboutie que les plans habituellement four-

nis. L'objectif était de pouvoir interroger le plan numérique en fonction des données descriptives enregistrées et d'obtenir rapidement des représentations visuelles de ces données en cours de fouille.

La procédure mise en place est décrite en Fig. 2. Elle vient se greffer sur une chaîne opératoire plus globale employée sur l'ensemble du projet archéologique du canal Seine-Nord Europe, orientée vers la production de données géomatiques et fédérée au sein d'un SIG (Bolo *et al.* 2010 et Rassat *et al.* 2011). Son principe est de relier les données provenant de l'enregistrement de terrain sur CADoc et celles provenant des plans topographiques au fur et à mesure de l'accumulation des données de fouille.

L'exploitation de cet outil s'effectue directement sur une tablette durcie sous Quantum GIS et permet de produire rapidement des cartes thématiques, des cartes de répartition, des cartes typologiques, des listings, etc. La communication et la formalisation des échanges entre les différents intervenants (techniciens, responsable d'opération, topographe, géomaticien) est primordiale pour le bon fonctionnement de cette procédure.

### 3.2 Avantages et contraintes

La visualisation graphique des données sous forme de cartes permet de repérer de façon efficace les erreurs d'enregistrement et de les corriger rapidement; on obtient ainsi en cours de fouille un enregistrement présentant un taux d'erreur minime. Les fonctions de recherche et de requête permettent d'obtenir des informations sur un ensemble de faits, ou de les localiser spatialement. Par exemple, il est utile de pouvoir dénombrer et identifier en temps réel les faits fouillés et ceux qui restent à fouiller (Fig. 3), ou d'interroger directement un élément du plan pour en connaître les informations détaillées.

Cette cartographie simple en cours d'opération est un outil précieux pour la compréhension et l'interprétation du site fouillé et apporte une aide à la réflexion, à la gestion et à la décision essentiels à l'élaboration de la stratégie de fouille. Elle apporte également des éléments précis, fiables et utiles dans les relations avec les différents intervenants de l'opération: agents du Service Régional d'Archéologie, assistants, adjoints et spécialistes techniques et scientifiques, aménageur.

La principale contrainte liée à cet outil est le besoin de compétences que sa mise en pratique implique: le responsable d'opération et les agents qui souhaitent l'employer doivent avoir suffisamment de connaissances pour utiliser les fonctions basiques de logiciels de cartographie et surtout pour en appréhender les potentiels. De plus, un géomaticien est indispensable pour mettre en place la procédure et assurer l'assistance technique aux utilisateurs. En outre, un tel dispositif ne peut fonctionner que si l'enregistrement de terrain est rigoureux, ce qui peut impliquer un temps non négligeable de correction quotidienne des saisies.

Fig. 3 – Exemple d'utilisation du SIG: la gestion de la fouille.

Fig. 4 – Utilisation d'une tablette durcie sur le terrain et relevé de bâti par photographies redressées.

## 4. Systématisation du relevé de bâti par photographies redressées

### 4.1 Principe et méthodologie

Le décapage de l'opération de Noyon, qui recoupe la *pars rustica* d'une *villa* gallo-romaine, a mis au jour 25 bâtiments. Le relevé en plan de l'ensemble de ces structures sur papier millimétré aurait mobilisé des moyens humains très conséquents et aurait consommé une grande quantité du temps alloué au chantier, aussi le relevé par photographie zénithale a-t-il été privilégié. Cette méthode, assez répandue par ailleurs, est ici systématisée sur l'ensemble des bâtiments et des structures importantes, cumulant une surface couverte de presque un hectare, et un protocole est employé de façon homogène.

Chaque bâtiment est pourvu de points de redressement levés en topographie et fait l'objet d'une couverture photographique à la perche<sup>2</sup>. Il ne s'agit pas d'effectuer une photogrammétrie pointue à des fins de modélisation 3D ou de recherche de précision, mais plutôt d'obtenir une mosaïque géoréférencée, aux déformations photographiques compensées, qui réponde à l'exigence de précision d'un relevé archéologique. Le redressement et le géoréférencement des images s'effectuent en base sous ArcMap et le pierre-à-pierre des bâtiments est alors vectorisé par une infographiste. Le dessin obtenu retourne sur le terrain sous forme papier ou sous forme numérique sur les tablettes durcies

<sup>2</sup> La perche photo utilisée sur le chantier de Noyon a été imaginée et fabriquée par P. Neury (Inrap CIF).

pour être mis à jour et corrigé en fonction des observations de terrain, de sorte que le relevé final résulte d'interprétations *in situ*. Celui-ci est alors validé et intégré au plan topographique global.

#### 4.2 Avantages et contraintes

Le principal atout de ce procédé en regard des méthodes employées habituellement est l'économie de temps générée par la vectorisation en lieu et place du dessin papier, et la libération des personnels affectés généralement à cette tâche pour d'autres travaux.

Le dessin d'après photographie s'avère également plus précis que ce que l'on peut obtenir en dessin manuel *in situ*, à l'échelle d'un bloc (contour plus exact) comme à l'échelle d'un bâtiment, la vue zénithale d'ensemble apportant une meilleure compréhension de la structure que la vue oblique à hauteur d'homme et les mesures au décimètre. En outre, la précision des contours ainsi obtenus et de leur géoréférencement peut être quantifiée lors du redressement, inscrivant ce procédé dans une démarche de description de la qualité des données archéologiques, chose difficilement évaluable lors du dessin manuel.

Cette méthode ne peut fonctionner que si les clichés et les points de redressement sont réalisés avec soin. Les photographies doivent être bien perpendiculaires au plan visé, les points de redressement suffisamment nombreux sur chaque cliché et à niveau constant. Par ailleurs, la vectorisation peut s'avérer délicate en fonction du contraste induit par le type de sédiment de la structure et de l'encaissant.

### 5. Bilan général

Les méthodes d'enregistrement employées sur le chantier de Noyon sont simples et assez largement connues, mais font généralement l'objet de travaux de post-fouille; le choix est fait ici de transférer une partie de ces activités vers la phase de terrain. Cela présente un double intérêt: économiser du temps d'étude dédié à des travaux longs, fastidieux et générateurs d'erreurs, et permettre en cours de fouille une compréhension du site plus exacte, plus complète et plus fiable. L'utilisation de supports techniques adaptés et la mise en place de procédures régissant ces méthodes permettent la centralisation de l'information sur un même support logiciel, un même support physique, et assurent l'intégrité et l'homogénéité de l'enregistrement archéologique. L'emploi de telles méthodes n'est possible que si la motivation et les compétences nécessaires sont réunies. Leur réussite est conditionnée par l'accès à la formation des agents concernés (responsables et techniciens d'opération) et par l'existence de postes dédiés à ces activités (géomaticien, archéomaticien,...). L'objectif du gain de temps et d'efficacité lié à ces procédés est de s'affranchir de certaines tâches chronophages de

etc.) pour laisser plus de place à l'étude et au développement scientifique, qui tiennent trop souvent le rôle de variable d'ajustement économique en archéologie préventive. Des initiatives de ce type se multiplient et seront amenées à se développer encore; gageons que malgré le contexte financier lourd qui pèse sur la discipline, elles ne soient pas l'argument d'une révision à la baisse des moyens dans une optique commerciale, mais qu'elles soient mises au service de la recherche archéologique.

Aurélien Bolo

Inrap – Canal Seine-Nord Europe

Caroline Font

Inrap – Grand Sud-Ouest

Marjolaine De Muylder, Thomas Guillemard

Inrap – Centre Ile-de-France

## BIBLIOGRAPHIE

- Bolo A., Font C., Fontaine A., Hulin G., Mazet S., Rassat S. 2010, *The CSNE (Canal Seine-Nord Europe) Project*, in F. Contreras, M. Farjas, F.S. Melero (eds.), *Conference on Computer Applications and Quantitative Methods "Archaeology Fusion of Cultures"* (Granada 2010), BAR International Series, 2494, Oxford, Archaeopress.
- Desachy B. 2008, *De la formalisation du traitement des données stratigraphiques en archéologie de terrain. Vol. 2: Propositions d'outils – premières expérimentations*, thèse de doctorat, Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Paris.
- Fournier L. (ed.) 2010, *Chilleurs-aux-Bois, Loiret, La Rouche, Les Tirelles: Une occupation du Mésolithique à l'époque moderne en Beauce*, Pantin, Inrap Centre-Île-de-France.
- Randoin B. (ed.) 1987, *Enregistrement des données de fouilles urbaines*, Tours.
- Rassat S., Font C., Bolo A., Fontaine A., Hulin G., Mazet S. 2011, *Le diagnostic archéologique du canal Seine-Nord Europe: méthodologie pour la mise en place d'un SIA*, in 18<sup>ème</sup> colloque d'archéométrie du GMPCA, Liège, Belgique.

## Remerciements

Un grand merci à toute l'équipe de fouille: Guillaume Aubazac, Maude Beurtheret, Julia Couillard-Lesage, Alexandre Coulaud, Mahaut Digan, Bastien Dubuis, Laure Fabien, Julia Gauvin, Jérôme Georges, Hervé Jaudon, Elodie Legret, John Lynch, Guillaume Martin, Nicolas Nauleau, Romain Pansiot, Sébastien Van Acker.

## ABSTRACT

Stratigraphic recording is at the basis of any scientific archaeological investigation. It is the memory of what has been excavated and then destroyed, and it allows scholars to collect information following a reasoned and rigorous procedure. The use of databases and their implementation through increasingly complex tools force us to harmonize and rationalize field recording and helps save time and improve efficiency, a primary issue for preventive archaeology. At the Inrap, in the context of the Seine-North Europe Canal project, a technical platform is working hand in hand with the field teams. This technical support has been used in Noyon (Oise) for the implementation and the follow-up of the recording system. The vastness of the operation influenced the choice of several techniques. Four field tablets, made available by the Inrap Direction Scientifique et Technique, were used. Each one was equipped with the database CADoc (by T. Guillemard) and the system Stratifiant (by B. Desachy) for the treatment of stratigraphical data. In addition, management and querying of spatial data were carried out directly on the terrain. The example of Noyon is the departure point for the presentation of these methods and allows the authors to discuss their advantages and drawbacks.

## L'ONTOLOGIE CIDOC CRM APPLIQUÉE AUX OBJETS DU PATRIMOINE ANTIQUE

L'intérêt porté, à l'occasion des *Journées d'Informatique et Archéologie de Paris*, au rôle des métadonnées et référentiels standards dans l'interopérabilité des données, nous permet de poursuivre le discours, amorcé lors des *JIAP* précédentes, sur l'utilisation d'ontologies (Szabados 2012), en particulier sur l'application de la norme de référence CIDOC CRM à des documents antiques. La capacité de cette norme à couvrir la diversité des notions attachées à un objet du patrimoine culturel en fait un outil possible pour rassembler des informations aussi hétérogènes que celles relatives aux documents archéologiques ou muséaux. Quelques exemples appropriés nous permettront de rappeler que l'association de choix techniques, d'une structuration fine de l'information et de l'emploi de vocabulaires de référence favorise l'interopérabilité et la sémantisation des données.

### 1. La ressource au cœur du paradigme numérique

Avec l'arrivée de l'Internet, la description des ressources issues du domaine patrimonial et de la recherche s'est complexifiée et internationalisée. Les applications web permettent en effet une visibilité accrue des contenus et une valorisation du travail de contextualisation de l'information produite par les institutions patrimoniales, muséales ou de recherche. Auparavant ces applications étaient principalement destinées à des utilisateurs "humains" qui devaient, par l'utilisation de moteurs de recherche, le contenu potentiel des bases de données, mais aujourd'hui les robots sont techniquement capables d'interpréter ces informations pour les redéployer dans d'autres services. La "page" web en tant que document laisse progressivement place à un espace calculé où les données sont générées à la volée selon les paramètres de l'utilisateur. Quotidiennement nous manipulons donc de plus en plus de contenus computationnels plutôt que de contenus documentaires (Delaforge, Gandon, Monnin 2012).

Or, si l'humain est capable de déduire les relations implicites entre plusieurs informations relatives à un même objet, les machines ont, elles, besoin d'un balisage et d'une sémantisation de l'information pour pouvoir raisonner. C'est le rôle que jouent les métadonnées dans l'environnement du numérique, leur finalité étant de décrire la donnée pour améliorer son indexation et la valoriser auprès des moteurs de recherche mais aussi de rendre possible l'interopérabilité entre différents systèmes. L'interopérabilité est une notion-clé dans ce qui est appelé aujourd'hui le "web de données" car c'est en libérant les

données du carcan des applications qu'il est possible de naviguer "au flair" et de rebondir sur des informations complémentaires à la ressource initiale. Mais, en se libérant des applications web, l'information perd sa contextualisation et il est alors indispensable de la documenter par l'ajout de métadonnées qui l'accompagneront entre les systèmes via le protocole HTTP.

Les standards jouent un rôle essentiel dans ce contexte d'interopérabilité car ils garantissent l'unicité des syntaxes et vocabulaires dans les échanges entre systèmes. Qu'ils soient HTML, XML ou encore RDF, selon les technologies utilisées, ils unifient la manière d'exprimer la donnée.

Le protocole OAI-PMH, fondé par l'Open Archives Initiative en 2001, est la première étape vers l'ouverture des données sur le web. Il autorise l'échange de métadonnées par la construction d'entrepôts que des fournisseurs de service moissonnent afin de réemployer ces métadonnées dans d'autres programmes. Ce protocole est par exemple utilisé pour des plate-formes d'agrégation de contenus scientifiques comme *Isidore*<sup>1</sup> ou celles recensant les collections culturelles comme *Europeana*<sup>2</sup>. L'OAI-PMH repose sur l'utilisation du schéma de métadonnées Dublin Core<sup>3</sup> dans la perspective d'une interopérabilité limitée à quelques dénominateurs communs<sup>4</sup>. En utilisant le protocole OAI-PMH couplé avec des métadonnées exprimées en DC, il est alors possible d'"exposer" ses données sur le web pour permettre à des moissonneurs d'indexer leurs métadonnées, voire de les enrichir.

Avec un exemple concret issu du patrimoine culturel, nous verrons que le Dublin Core reste insuffisant pour décrire la complexité d'un objet, car il ne vise pas à proposer une structure exhaustive de description mais plutôt un schéma pivot général d'interopérabilité. Pour couvrir la richesse sémantique d'un tel objet et la diversité de l'information qui lui est attachée, il existe des ontologies informatiques destinées à donner plus de sens aux balises et à contextualiser davantage les informations relatives à un domaine.

Le terme d'ontologie informatique a été emprunté au courant philosophique de l'Ontologie qui aborde l'étude des propriétés générales de l'être. D'abord utilisées en Intelligence Artificielle avant de s'étendre à d'autres champs de l'informatique, les ontologies définissent un vocabulaire commun à un domaine en structurant l'information par des ensembles de concepts (Leboeuf 2003). Elles servent ainsi à expliciter tout ce qui est implicite dans un domaine

<sup>1</sup> <http://rechercheisidore.fr/>

<sup>2</sup> <http://www.europeana.eu/>.

<sup>3</sup> Norme ISO 15836:2009 (révision d'ISO 15836:2003): *Information et documentation - L'ensemble des éléments de métadonnées Dublin Core*.

<sup>4</sup> Le Dublin Core (DC) possède plusieurs niveaux de raffinement: soit le Dublin Core Simple exprimant quinze éléments (titre, auteur, éditeur, sujet, droit, etc.), soit le Dublin Core qualifié nuancant certaines balises (par exemple, *dcterms:isPartOf* pour signifier une relation hiérarchique entre deux données).

en décrivant les concepts eux-mêmes, leurs caractéristiques, leurs spécificités, leurs relations, et les conditions ou restrictions qui peuvent s'appliquer.

L'ontologie informatique est une aide précieuse non seulement pour exprimer et analyser des données hétérogènes dans des applications logicielles, mais aussi pour les partager et les documenter, car tout ce qui est "évident" dans la structuration de l'information d'une ressource devient explicite par les définitions mêmes des classes et propriétés utilisées. Mais l'interopérabilité des données n'est pas la seule raison motivant l'utilisation d'ontologies; elles peuvent également s'insérer à différents stades d'un projet de création de systèmes d'informations, que ce soit pour établir une nomenclature commune entre différentes disciplines ou pour servir de socle lors de comparaison de jeux de données pour un même domaine.

L'implémentation des ontologies dans des systèmes d'informations en vue d'une ouverture des données sur le web va bien au-delà de l'utilisation de l'OAI-PMH et du Dublin Core. En effet, l'expression des données en RDF (Resource Description Framework) associée à l'emploi de chaînes de traitement informatique visant à faire correspondre, voire enrichir, les données par l'utilisation du vocabulaire et des dépendances liés à l'ontologie<sup>5</sup> (Szabados 2012, 13-19), permet d'envisager le web de données.

## 2. Les données du patrimoine culturel et le Dublin Core: le cas d'une statue composite

Le Dublin Core, même dans sa version qualifiée, ne permet de traiter qu'une partie des informations liées à un objet du patrimoine archéologique ou muséal, et cela en appauvrissant certaines des notions sélectionnées. À titre d'exemple, une notice sur un objet de musée a été rédigée de façon à faire ressortir les limites de l'emploi des quinze éléments de description *Dublin Core Simple* pour rassembler, et surtout restituer, les informations riches et variées relatives à l'œuvre – une statue antique conservée au Musée du Louvre et représentant à l'origine Minerve (Delbrück 1932)<sup>6</sup> puis, au XVIII<sup>e</sup> s. et avant restauration, la personnification de Rome – mais aussi à l'enregistrement qui lui est consacré dans le corpus numérique LIMCicon (*LIMC-France*)<sup>7</sup>, voire à sa photographie numérique (Fig. 1).

<sup>5</sup> Par exemple, le portail CLAROS (<http://www.clarosnet.org/>), auquel participe le LIMC, est fondé sur l'utilisation du RDF et d'un schéma pivot construit sur l'ontologie CIDOC CRM. Cf. CLAROSwiki (<http://explore.clarosnet.org/wiki/>).

<sup>6</sup> Paris, Musée du Louvre inv. MR 341, usuel Ma 1056; A.-V. Szabados, LIMCicon ID 14804, in *LIMC-France*, <http://www.limc-france.fr/objet/14804/> (consultation 29/10/2012).

<sup>7</sup> LIMCicon est diffusé sur *LIMC-France*, site web de l'équipe française de la Fondation Internationale pour le LIMC: <http://www.limc-france.fr/>.

Fig. 1 – Notice descriptive en *Dublin Core Simple* d'une statue de Minerve du Louvre (MR 341, Ma 1056).

Dans le cas de cette statue pourraient être privilégiées, soit les informations relatives au document numérique – l'enregistrement – traitant de l'objet (en caractères gras dans l'exemple), soit celles concernant l'œuvre elle-même, ou encore le thème représenté<sup>8</sup>. Ici, les balises *dc:date* reçoivent des notions différentes sans les différencier, en l'occurrence les périodes de fabrication et de modification de la statue (*II<sup>e</sup> s. apr. J.-C.; Empire romain; XVII<sup>e</sup>-XVIII<sup>e</sup> s. apr. J.-C.*), la date de création (*2011/08/20*) et la date de modification de l'enregistrement (*2012/09/27*)<sup>9</sup>. On aurait également pu ajouter la date de la découverte de l'objet lors de la fouille archéologique, ou encore celle de son entrée au Louvre. Francuccio Francucci, qui l'a rénovée et complétée, est proposé comme *dc:creator*, ainsi que le terme *inconnu*, qui pourrait être automatiquement extrait du champ "créateur de l'objet" (artiste antique) de la ressource numérique d'origine. L'auteur de l'enregistrement numérique – l'équipe *LIMC-France* – pourrait également être le *dc:creator*. Quant à la

<sup>8</sup> Dans un schéma destiné à un entrepôt OAI-PMH fondé sur l'utilisation du DC non qualifié, plusieurs champs DC pourraient être réservés aux informations sur le document numérique ou nécessaires au moissonnage des données et à leur gestion dans l'entrepôt.

<sup>9</sup> Même en utilisant *dcterms:created* pour la date de création, celle de l'objet ne serait pas différenciée de celle de l'enregistrement.

balise *dc:coverage* (couverture), elle mêle plusieurs informations temporelles et géographiques, la notion de couverture géographique pouvant concerner les lieux de création et de trouvaille de l'objet aussi bien que ses divers lieux de conservation, collections passées et actuelles<sup>10</sup>. Si l'on se limite à la statue antique, il est également impossible, avec *dc:title* et *dc:description*, de distinguer les divers états de la statue et les deux identifications: *Minerve* et *Rome*.

Cette notice et les pratiques témoignent d'une grande latitude dans l'application du DC<sup>11</sup>. Le choix des données à insérer dépendant fortement du contexte de production et d'utilisation ou de réutilisation des données, la nature et la granularité de l'information sur le document peuvent être bien différentes dans les métadonnées d'une photographie d'une banque d'images généraliste et dans celles, par exemple, d'une ressource numérique élaborée par des spécialistes de la statuaire antique. L'éventail des éléments couramment envisagé par les spécialistes de l'étude des objets culturels est ici réduit; les notions retenues sont mises au même niveau, aplanies, dans le schéma de métadonnées DC. Les requêtes sur cette notice sélectionneront bien l'enregistrement demandé mais la restitution de l'information sera-t-elle détaillée assez précisément pour être utilisée par l'internaute ou par un autre système informatique?

... et comment formuler ceci:

*l'objet a été créé au II<sup>e</sup> s. apr. J.-C.*

*... était en porphyre et représentait Minerve*

*... provient du jardin de San Martino de' Monti à Rome*

*... fut acquise en 1646 par le cardinal Mazarin ... transférée à Paris, Collection Mazarin, puis dans la Collection de Louis XIV (en 1665) ... placée dans les jardins du Trianon ... saisie à la Révolution*

*... complétée par du bronze et rénovée par Francuccio Francucci au XVII<sup>e</sup> s.*

*... fut transformée en Rome au XVIII<sup>e</sup> s., par le changement de sa tête et de son bras gauche*

*... a été étudiée par X qui l'a associée à la gravure réalisée en 1681 par Étienne Baudet (Baudet 1681), ... a été comparée à une autre statue par Y ...*

Si le référentiel de métadonnées Dublin Core est adapté aux informations sur la ressource numérique elle-même et peut rassembler une sélection d'éléments pertinents pour des besoins particuliers, par exemple pour un

<sup>10</sup> Ces ambiguïtés ne seraient pas davantage levées si on avait isolé les données géographiques de <coverage> en utilisant le raffinement du DC qualifié pour la "couverture spatiale".

<sup>11</sup> Cf. le résumé de l'ISO 15836:2009: [http://www.iso.org/iso/fr/home/store/catalogue\\_ics/catalogue\\_detail\\_ics.htm?csnumber=52142](http://www.iso.org/iso/fr/home/store/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?csnumber=52142).

entrepôt OAI ou pour des requêtes posées lors de recherches généralistes, il faut recourir à des standards développés pour des domaines spécifiques aux GLAM<sup>12</sup> afin d'élaborer des ressources numériques ou des schémas de méta-données plus riches sémantiquement et mieux adaptés à ce type de notions. L'ontologie CIDOC CRM permet de modéliser ces connaissances et de restituer des données en tenant compte de l'évolution de l'œuvre, de son parcours, de son contexte historique et de son environnement culturel.

### 3. Le CIDOC CRM, une ontologie pour l'information relative au patrimoine culturel

L'ontologie CIDOC CRM, qui émane du monde des musées<sup>13</sup>, pourrait couvrir les informations attachées à un document culturel, ou portées par celui-ci, en les "contextualisant" et en évitant les ambiguïtés précédemment présentées. Elle fournit en effet des définitions et un modèle pour décrire les notions et les relations permettant de documenter le patrimoine culturel.

La définition de cette norme ISO<sup>14</sup> rappelle son usage pour l'interopérabilité des données, signale l'exigence de qualité de l'information traitée – notamment que le CRM est destiné "à supporter le niveau de détail et de précision exigés par des professionnels des musées et des chercheurs dans le domaine" – et précise le périmètre de son application: sont concernées les informations relatives au patrimoine culturel (*Cultural Heritage*), matériel et immatériel, à savoir "tout type de matériel rassemblé et exposé par des musées et des institutions apparentées", y compris "des collections, des sites et des monuments en rapport avec des domaines tels que l'histoire sociale, l'ethnographie, l'archéologie, les beaux-arts et les arts appliqués, l'histoire naturelle, l'histoire des sciences et de la technologie." La définition souligne également la capacité du modèle à prendre en compte les "informations contextuelles (c'est-à-dire historiques, géographiques et théoriques qui donnent aux collections de musée leur signification culturelle et leur valeur)".

<sup>12</sup> Parmi les standards utilisés dans les domaines des GLAM (Gallery Library Archive Museum): EAD (Encoded Archival Description); FRBR (Functional Requirements for Bibliographic Records); TEI (Text Encoding Initiative) et son émanation pour l'épigraphie, EpiDoc; EDM (Europeana Data Model), pour Europeana (<http://pro.europeana.eu/edm-documentation>).

<sup>13</sup> Le CRM (Conceptual Reference Model) a été élaboré par le Comité International pour la Documentation (CIDOC) du Conseil International des Musées (ICOM): <http://www.cidoc-crm.org/>. Norme ISO 21127:2006. L'ontologie continue d'évoluer: la version 5.0.4 du document de référence, *Definition of the CIDOC Conceptual Reference Model*, qui date de novembre 2011, peuvent être téléchargées en anglais sur le site du CIDOC: [http://www.cidoc-crm.org/official\\_release\\_cidoc.html](http://www.cidoc-crm.org/official_release_cidoc.html). La dernière mise à jour et sa nouvelle traduction française sont actuellement présentées à l'ISO. Pour une documentation abondante, cf. le site du CIDOC.

<sup>14</sup> *Definition of the CIDOC Conceptual Reference Model*, v. 5.0.4, 2011, p.i-ii ([http://www.cidoc-crm.org/docs/cidoc\\_crm\\_version\\_5.0.4.pdf](http://www.cidoc-crm.org/docs/cidoc_crm_version_5.0.4.pdf)). Cf. la définition résumée sur la page web de l'ISO 21127:2006.

Fig. 2 – Hiérarchie simplifiée des Classes du CIDOC CRM ([http://www.cidoc-crm.org/cidoc\\_core\\_graphical\\_representation/hierarchy.html](http://www.cidoc-crm.org/cidoc_core_graphical_representation/hierarchy.html)).

Ce dernier point et la large couverture du CRM permettent de l'envisager comme moyen de rassembler, de façon normalisée, des informations et des données sur des "objets" culturels aussi divers qu'une fouille archéologique, une pratique culturelle attachée à des objets ethnologiques (la coiffe de plume d'un amérindien et sa symbolique), un personnage historique et les événements qui lui sont liés (Napoléon, etc.), des courants de pensée ou artistiques et leurs acteurs comme le groupe des artistes ayant participé en 1913 à l'*Armory Show* de New York et l'impact décisif de l'événement sur l'art américain du XX<sup>e</sup> siècle, ou même des phénomènes entre deux expressions artistiques comme l'influence du cabaret le *Bœuf sur le toit* sur l'introduction du jazz dans la musique française<sup>15</sup>.

L'ontologie définit environ cent "Classes" (codées E...), qui correspondent à des notions, des concepts, et près de cent cinquante "Propriétés" (P...) qui sont des interactions entre les Classes (prédicats la plupart du temps exprimés sous forme de verbe).

<sup>15</sup> Cf. les rencontres consacrées, à l'initiative d'A. Tharaud, à la Cité de la Musique (14-10-2012), à ce moment clé de la création musicale française des années 20 ([http://citedelamusique.fr/pdf/note\\_programme/np\\_12269.pdf](http://citedelamusique.fr/pdf/note_programme/np_12269.pdf) (consultation: 13-10-2012)).

Par exemple, l'information "la statue est en porphyre" pourrait être reformulée:

Classe E24\_Physical\_ManMade\_Thing = *statue* | Propriété P45\_consists\_of | Classe E57\_Material = *porphyre*

La granularité de l'information est assurée par une organisation hiérarchique des Classes, les définitions étant de plus en plus de précises au fil des "sous-classes" (Fig. 2)<sup>16</sup>. La norme précise également les associations Classes/Propriétés (concepts/verbes) possibles, sachant qu'une sous-classe hérite des propriétés de ses classes parentes. Plusieurs de ces interactions et relations sont schématisées dans une série de diagrammes disponibles sur le site du CIDOC<sup>17</sup>.

Le modèle s'articule autour de six axes forts (Tzompanaki, Doerr 2012):

- Objet, matériel ou immatériel (*Thing*);
- Personne, physique ou morale, individu ou groupe (*Actor*);
- Événement (*Event*);
- Lieu, notion géographique ou emplacement (*Place*);
- Temps (*Time*);
- Concept.

À ces notions-clés s'ajoutent d'autres éléments permettant de traiter notamment les dimensions et l'état de l'objet, les droits, la documentation, la gestion de collections, etc. Le modèle est extensible et d'autres notions peuvent être librement ajoutées afin de couvrir des besoins particuliers, à condition de respecter les règles de l'ontologie, notamment l'héritage de la hiérarchie.

Dans la mesure où l'ontologie a acquis le statut de norme ISO, et grâce à l'ensemble de ses définitions, le document de référence devient un outil pour

#### 4. Les données sur la statue de Minerve/Rome: structurer l'information

En appliquant les principes du CRM, on pourrait rendre compte du parcours et des états de la statue de Minerve/Rome, modéliser l'information en distinguant par exemple les matériaux d'origine et de rénovation, les diverses interprétations dues au changement du personnage représenté, ou encore les droits auxquels sont assujettis l'œuvre, ses reproductions et notices numériques (Fig. 3). La sémantisation des données passe non seulement par le choix de

<sup>16</sup> Schéma développé: [http://www.cidoc-crm.org/cidoc\\_graphical\\_representation\\_v\\_5\\_1/class\\_hierarchy.html](http://www.cidoc-crm.org/cidoc_graphical_representation_v_5_1/class_hierarchy.html).

<sup>17</sup> [http://www.cidoc-crm.org/comprehensive\\_intro.html](http://www.cidoc-crm.org/comprehensive_intro.html) (consultation: 2012-10-25).

Fig. 3 – Extrait d'une proposition de schéma simplifié CIDOC CRM/XML de la statue de Minerve (Louvre MR 341, Ma 1056).

la norme, de ses Classes et de ses Propriétés pour les métadonnées mais aussi par leur place dans le modèle. La proposition de la Fig. 3, exprimée dans une formulation simplifiée inspirée du XML<sup>18</sup>, présente l'organisation de quelques unes de ces informations: les matériaux actuels sont signalés directement parmi les données sur la statue tandis que les matériaux d'origine sont "encapsulés" dans l'ensemble réservé à la fabrication de l'œuvre antique. Les droits de l'objet et ceux de la reproduction photographique sont eux aussi insérés dans leurs parties respectives et on aurait pu faire de même avec leurs dates.

Les données sur la statue en tant qu'objet conservé au Louvre pourraient être directement traitées avec le schéma LIDO, modèle fondé sur le CIDOC CRM et réalisé pour le traitement de l'information relative aux objets et collections de musées<sup>19</sup>, mais l'information produite par le monde de la recherche diffère de la documentation muséale et LIDO pourrait n'en couvrir qu'une partie. Préserver la spécificité des approches scientifiques est important et le schéma-pivot CRM-IDA, en cours d'élaboration pour l'interopérabilité de corpus numériques d'objets produits par des équipes de recherche, pourra associer LIDO et les éléments du CRM (Szabados 2012b)<sup>20</sup>.

## 5. Traiter les informations complexes d'un objet de fouilles

L'étude d'une mosaïque romaine au destin tourmenté réunit des connaissances variées et lacunaires, et fait appel à de multiples documents épars (Fig. 4): découvert en 1860 par M. Espina lors de la fouille d'une nécropole de Sousse, l'antique Hadrumetum, le pavement fut démantelé et ses scènes figurées transférées dans le palais de M. Khaznadar, alors Grand Vizir de la Régence de Tunis, puis, après la chute de ce dernier, en partie déplacées dans d'autres palais. Bien que considéré comme actuellement perdu – comme le reste du pavement – le panneau du navire de Thésée est rapproché hypothétiquement d'un document presque similaire conservé au Penn Museum de Philadelphie (Luce 1916)<sup>21</sup> grâce aux documents et dessins réalisés lors de la découverte,

<sup>18</sup> Le principe de l'encapsulation des balises/données est restitué mais, pour simplifier, seul le cœur de la balise ouvrante est donné.

<sup>19</sup> LIDO (Lightweight Information Describing Objects) v1.0, novembre 2010. Pour la documentation, cf. les pages de l'ICOM sur LIDO: <http://network.icom.museum/cidoc/working-groups/data-harvesting-and-interchange/what-is-lido/> (consultation: 2012-10-26). LIDO tient compte des schémas *CDWA Lite* (Categories for the Description of Works of Art) ([http://getty.art.museum/research/publications/electronic\\_publications/cdwa/cdwalite.html](http://getty.art.museum/research/publications/electronic_publications/cdwa/cdwalite.html)) et *museumdat* (<http://www.museumdat.org/index.php>). Pour des exemples d'utilisation de LIDO: <http://network.icom.museum/cidoc/working-groups/data-harvesting-and-interchange/lido-overview/examples/>. Pour les mappings d'un même objet avec LIDO et avec EDM: *Europeana Data Model. Mapping Guidelines v1.0.1* (24-02-2012) Annexe A, 32-37: <http://pro.europeana.eu/documents/900548/ea68f42d-32f6-4900-91e9-ef18006d652e> (consultation: 2012-10-26).

<sup>20</sup> Programme IDA (Interopérabilité des Documents Anciens).

<sup>21</sup> Inv. MS4012; A.-V. Szabados, LIMCicon ID 14822, in *LIMC-France*, <http://www.limc-france.fr/objet/14822> (consultation: 22-10-2012).

Fig. 4 – Exemple de modélisation de l'information d'une mosaïque découverte à Sousse.

Fig. 5 – Extrait de schéma CIDOC CRM/XML consacré à la ville de Sousse.

aux comptes rendus et témoignages de l'époque, ainsi qu'aux recherches plus récentes comme celles effectuées par W. A. Daszewski pour établir un corpus des représentations musicales antiques de la légende de Thésée et du Minotaure (Foucher 1960; Daszewski 1977)<sup>22</sup>.

Les Classes et les Propriétés du CIDOC CRM permettent de traiter l'une des modélisations possibles de ces connaissances et de leurs relations<sup>23</sup> (Fig. 4), qui restitue notamment le parcours géographique et historique de la mosaïque<sup>24</sup>, son état au fil du temps, son identification, ou encore ses liens avec la fouille de la nécropole et les autres sépultures découvertes, avec les acteurs des événements, avec sa documentation (étude de l'hypogée, dessins, publications, photographies, etc.). L'information géographique, particulièrement importante dans ce cas (Figs. 4-5), peut être détaillée, tant au niveau du lieu lui-même, *Sousse* (ses appellations: *E48\_Place Name*, *E44\_Place Appellation*; ses coordonnées: *E47\_Spatial Coordinates*; etc.) que des différentes localisations de l'objet (*P53\_has former or current location/ P55\_has current location/ P54\_has current permanent location | E53\_Place*).

Par sa capacité à réunir des informations hétérogènes et à conserver leurs liens avec leur histoire, leur parcours ou les personnes impliquées, cela en particulier grâce à la préservation du contexte événementiel, le CRM pourrait couvrir une grande partie des données produites à l'occasion d'une fouille archéologique. Le modèle anglais CRM-EH, élaboré dans le cadre du projet STAR (Semantic Technologies for Archaeology Resources), pour un système d'information destiné à rendre plusieurs ressources archéologiques interopérables, est une extension de l'ontologie<sup>25</sup> (Binding, May, Tudhope 2008).

## 6. Objets, modèles, répliques, typologies

Le CRM rassemble ces informations complexes non seulement en donnant les moyens de reformuler les connaissances mais aussi en facilitant les points de jonction, comme dans le cas d'une base de données relationnelle conçue pour un programme pluridisciplinaire et archéologique sur l'histoire des mines (Hiebel, Hanke, Hayek 2010). Les rapprochements avec d'autres standards métiers sont possibles, ainsi qu'avec des documents de référence.

<sup>22</sup> A.-V. Szabados, LIMCicon ID 14797, in *LIMC-France*, <http://www.limc-france.fr/objet/14797> (consultation: 22-10-2012).

<sup>23</sup> Pour des associations objet/ personne/ temps/ événement/ lieu..., cf. *Object Association Information*: [http://www.cidoc-crm.org/cidoc\\_graphical\\_representation\\_v\\_5\\_1/object\\_association.html](http://www.cidoc-crm.org/cidoc_graphical_representation_v_5_1/object_association.html).

<sup>24</sup> Diagramme espace/temps: [http://www.cidoc-crm.org/cidoc\\_graphical\\_representation\\_v\\_5\\_1/spatial\\_temporal.html](http://www.cidoc-crm.org/cidoc_graphical_representation_v_5_1/spatial_temporal.html).

<sup>25</sup> Diagramme de la modélisation: [http://www.cidoc-crm.org/docs/AppendixA\\_DiagramV9.pdf](http://www.cidoc-crm.org/docs/AppendixA_DiagramV9.pdf). Projet STAR: <http://hypermedia.research.glam.ac.uk/kos/star/>.

Fig. 6 – L'*Aphrodite de Cnide*: original, modèle, copies et types de référence (*Cnidienne* et clichés des terres cuites du Louvre: A.-V. Szabados; 1, 3 et 6: Wikimedia Commons).

Par exemple, le lieu de découverte de la mosaïque, *Sousse*, peut être directement associé à un vocabulaire spécialisé, un thésaurus de référence comme le *TGN*Getty<sup>26</sup> grâce à *P71\_lists (is listed in) | E32\_Authority Document* (Fig. 5, texte souligné)<sup>27</sup>. L'ontologie donne les moyens de créer des typologies, des nomenclatures, des taxonomies dans des domaines relevant du concept, de l'iconique, du sonore, par exemple des modèles de référence visuels (type iconographique), des objets-types, des séquences sonores, etc.<sup>28</sup>

<sup>26</sup> <http://www.getty.edu/research/tools/vocabularies/tgn/>.

<sup>27</sup> Un thésaurus peut aussi être inséré grâce à la Classe *E55\_Type* qui "type" des données ou des ensembles de données.

<sup>28</sup> Cf. diagramme *Taxonomic Discourse*: [http://www.cidoc-crm.org/cidoc\\_graphical\\_representation\\_v\\_5\\_1/taxonomic\\_discourse.html](http://www.cidoc-crm.org/cidoc_graphical_representation_v_5_1/taxonomic_discourse.html). Les normes pour thésaurus (SKOS, ISO 25964) pourraient être privilégiées pour des typologies plus stables que les celles des modèles/répliques antiques (Fig. 6) qui évoluent en fonction de la recherche.

Sur la Fig. 6, l'*Aphrodite Braschi*, une statue d'époque hellénistique aujourd'hui conservée à Munich (Vierneisel-Schlörb 1979)<sup>29</sup>, est placée au centre d'un réseau complexe d'informations:

L'*Aphrodite Braschi* [1] serait une copie de l'*Aphrodite de Cnide* de Praxitèle (Pasquier, in Pasquier, Martinez 2007), réalisée au IV<sup>e</sup> siècle av. J.-C. et détruite depuis des siècles. Lors de sa fabrication, la statue de Praxitèle était un objet matériel [2] (*E12\_Production* → *E18\_Physical Thing*) mais sa renommée, transmise dès l'Antiquité par ses évocations dans des sources écrites (*E31\_Document*) et ses copies [3] (*E11\_Modification/ E12\_Production* → *E18\_Physical Thing*) en fit un type iconographique, un modèle conceptuel [4] (*E65\_Creation* → *E28\_Conceptual Object*). L'*Aphrodite Braschi* n'en est pas la seule copie et d'autres, comme la *Vénus Capitolina* (Delivorrias et al. 1984, 52, n° 409)<sup>30</sup> [5], présentent des différences dans la pose du personnage (position des mains). L'*Aphrodite Braschi* est considérée comme l'un des modèles de référence de sa série (*P137\_exemplifies*) ce qui en fait aussi un type iconographique – un modèle conceptuel – dont l'exemple-type complet pourrait être la *Vénus Colonna* (Delivorrias et al. 1984, 50, n° 391)<sup>31</sup> [6] (+ *P136.1* ou *P137.1\_in the taxonomic role*).

Avec le CRM, ces informations sont organisées en distinguant clairement les objets matériels (*E18\_Physical Thing*) des objets conceptuels (*E28\_Conceptual Object*) et en conservant les relations entre ces œuvres à la fois semblables ("*statue antique d'Aphrodite nue, avec une draperie et un vase*") et bien différentes. L'*Aphrodite de Cnide* peut être présentée comme le modèle de référence de l'*Aphrodite Braschi*, cette dernière comme un autre modèle de référence, la *Vénus Colonna* comme un taxon, au sein d'une typologie des schémas iconographiques antiques d'Aphrodite/Vénus [7] (*-anadyomène, -genitrix, -accroupie, etc.*). L'activité savante consistant à établir un type à partir de la comparaison de ces sources matérielles et écrites peut quant à elle être exprimée grâce à l'événement *E83\_Type Creation* et ses articulations (*P135\_created type; P136\_was based on, etc.*).

## 7. S'approprier l'ontologie

La documentation produite autour de l'ontologie est de plus en plus abondante sur le site du CIDOC mais, malgré les tutoriels, schémas explicatifs et partages d'expérience, la large couverture de la norme et les nuances subtiles de ses définitions ne facilitent pas l'appropriation du CRM. L'ontologie est relativement facile à comprendre et à manipuler – en particulier dans la

<sup>29</sup> Munich, Glyptothek Gl 258; A.-V. Szabados, LIMCicon ID 14767, in *LIMC-France*, <http://www.limc-france.fr/objet/14767> (consultation: 28-09-2012).

<sup>30</sup> Rome, Musées Capitolins, Palazzo dei Conservatori, inv. 409.

<sup>31</sup> Vatican, inv. 812.

phase de modélisation de l'information durant laquelle elle fournit, pour la réflexion, un éventail de concepts liés au domaine culturel – mais on constate qu'elle permet de modéliser une même information de plusieurs façons différentes. Dans ce cas, même si les données sont bien enrichies sémantiquement, qu'en est-il effectivement de l'interopérabilité de ces données? (Szabados *et al.* 2012; Haslhofer, Nussbaumer 2012; Oldman 2012; Binding, May, Tudhope 2008<sup>32</sup>).

La création et l'adoption par les utilisateurs de modèles et de schémas communs, comme LIDO pour les collections du patrimoine, pourraient apporter des solutions et il a semblé nécessaire, lors des journées *THATCamp Paris 2012*, de réunir en France une communauté d'intérêt et de pratique (*ontologie-patrimoine*: <https://listes.services.cnrs.fr/www/info/ontologie-patrimoine>), largement ouverte et trans-disciplinaire, afin de faciliter les échanges et les partages d'expérience, ainsi que les retours vers les concepteurs de l'ontologie<sup>33</sup>.

La sémantisation des ressources numériques, destinée à préserver les diverses facettes du savoir et à favoriser l'insertion de la production scientifique dans le web sémantique, voire le Web de données, est optimisée par l'association de standards techniques et documentaires. Parmi ceux-ci, l'ontologie de domaine CIDOC CRM se démarque par sa capacité à rassembler et traiter des connaissances et des données hétérogènes, mais associées, en conservant leurs liens et leurs contextualisations. L'un des constats formulés dans les retours d'expérience sur l'application pratique de la norme porte sur l'importance de l'implication des spécialistes du domaine scientifique traité lors de la modélisation de leur discours. Les exemples présentés s'inscrivent dans cette démarche et montrent que le CRM permet d'exprimer ces connaissances culturelles avec une granularité fine.

Rosemonde Letricot

IRHT, Service Développement et Interopérabilité, Orléans

Anne-Violaine Szabados

CNRS UMR 7041 ArScAn

## BIBLIOGRAPHIE

Baudet E. 1681, *Tableau du Cabinet du Roi, statues et bustes antiques des Maisons Royales*, t. 1, pl. 19 (estampe conservée au Musée national des châteaux de Versailles et de Trianon, inv. A15-133).

<sup>32</sup> «The abstractness of the CRM and the lengthy relationship chains arising from the event-based model also raised issues for designing appropriate user interfaces» (Binding, May, Tudhope 2008, 283); «As with BRICKS, it proved necessary to create technical extensions to the CIDOC CRM to deal with attributes required for practical implementation concerns» (*ibid.*, 289).

<sup>33</sup> Szabados *et al.* 2012, § 17 sq.

- Binding C., May K., Tudhope D. 2008, *Semantic Interoperability in Archaeological Datasets: Data Mapping and Extraction via the CIDOC CRM*, in *Proceedings of the 12<sup>th</sup> European Conference on Digital Libraries (ECDL)*, Berlin, Springer Verlag, 280-290.
- Ciezar P. 2012, *Acquisition et enregistrement de données à grande échelle en archéologie préventive*, in F. Giligny, L. Costa, R. Djindjian, P. Ciezar, B. Desachy (eds.), *Actes des 2<sup>e</sup> Journées d'Informatique et Archéologie de Paris (Paris 2010) – JIAP 2010*, «Archeologia e Calcolatori», Suppl. 3, 224-226.
- Daszewski W.A. 1977, *Nea Paphos II. La mosaïque de Thésée*, 125-126, n° 54.
- Delaforge N., Gandon, F., Monnin A. 2012, *L'avenir du web au prisme de la ressource*, in L. Calderan, P. Laurent, M. Lowinger, J. Millet (eds.), *Le document numérique à l'heure du Web de données*, Paris, ADBS éditions, INRIA, 229-252.
- Delbrück R. 1932, *Antike Porphyrwerke*, 70-71, pl. 18.
- Delivorrias A., Berger-Doer G., Kossatz-Deissmann A. 1984, *Aphrodite*, in *LIMC*, vol. 2.
- Foucher L. 1960, *Inventaire des mosaïques. Sousse*, 76 n° "57.167".
- Haslhofer B., Nussbaumer Ph. 2012, *CIDOC CRM in Practice*, novembre 2009, slides 10 sq. (<http://fr.slideshare.net/bhaslhofer/cidoc-crm-in-practice>).
- Hiebel G., Hanke K., Hayek I., 2010, *A relational database structure and user interface for the CIDOC CRM with GIS integration* (Nuremberg 2010) ([http://www.cidoc-crm.org/docs/Hiebel\\_crm\\_sig\\_2010.ppt](http://www.cidoc-crm.org/docs/Hiebel_crm_sig_2010.ppt)).
- Leboeuf P. 2003, *Le modèle CRM pour la documentation muséographique*, in *Journée d'étude de l'ADBS – La modélisation: pourquoi l'intégrer dans les systèmes d'information documentaire?* ([http://www.cidoc-crm.org/docs/adbs\\_crm.doc](http://www.cidoc-crm.org/docs/adbs_crm.doc)).
- Luce S.B. 1916, *Five Roman Mosaics*, «The Museum journal», 7, 18-26.
- Oldman D. 2012, *The British Museum, CIDOC CRM and the Shaping of Knowledge* ([www.oldman.me.uk/blog/the-british-museum-cidoc-crm-and-the-shaping-of-knowledge/](http://www.oldman.me.uk/blog/the-british-museum-cidoc-crm-and-the-shaping-of-knowledge/)).
- Pasquier A., Martinez J.-L. (eds.) 2007, *Praxitèle. Paris, Louvre 2007*, 139-151.
- Szabados A.-V. 2012a, *Du Système documentaire du LIMC au portail CLAROS. Interopérabilité et optimisation de l'information archéologique grâce à l'usage de normes*, in F. Giligny, L. Costa, R. Djindjian, P. Ciezar, B. Desachy (eds.), *Actes des 2<sup>e</sup> Journées d'Informatique et Archéologie de Paris (Paris 2010) – JIAP 2010*, «Archeologia e Calcolatori», Suppl. 3, 11-25.
- Szabados A.-V. 2012b, *Le site Web LIMC-France: iconographie de la mythologie et corpus d'œuvres antiques*, «Mouseion» 13, sept.-déc., 23-24 (<http://www.revistas.unilasalle.edu.br/index.php/Mouseion/article/view/690/747>).
- Szabados A.-V., Briatte K., Letricot R. et al. 2012, *Utiliser l'ontologie CIDOC CRM pour l'information relative au patrimoine culturel*, in *THATCamp (Paris 2012)*, 34-35, 41 sq. (<http://editionsms.h.revues.org/319>, mise en ligne 28-09-2012, consultation 04-10-2012).
- Tzompanaki K., Doerr M. 2011, *A New Framework for Querying Semantic Network*, part 3.1. *Designing fundamental categories*, 6 ([http://www.ics.forth.gr/tech-reports/2011/2011.TR419\\_Querying\\_Semantic\\_Networks.pdf](http://www.ics.forth.gr/tech-reports/2011/2011.TR419_Querying_Semantic_Networks.pdf) (consultation: 2012-10-27)).
- Vierneisel-Schlörb B. 1979, *Glyptothek München, Katalog der Skulpturen II*, 323-336 n° 31, fig. 158-164.

## ABSTRACT

Ancient objects, be they materials collected on archaeological sites or displayed in museums, simultaneously carry information (type and material, decoration, location, etc.) and are subject to study (analysis, reproduction, publication, etc.). The CIDOC CRM is an ontology intended to facilitate the integration, mediation and interchange of cultural heritage information. This standard gives us the possibility to structure detailed descriptions of individual items (a vase or a statue, etc.), of parts of a whole (a fragment or an element of architectural decoration), or of conceptual objects (models known through its replicas, typology, and taxonomy), and covers contextual information such as the historical, geographical and theoretical background. Associated with technical standards and thesauri, the CIDOC CRM is helpful for data interchange, interoperability, Semantic Web and Linked Data approach.