

Étude d'une structure dédiée à la production et l'exploration de données 3D appliquées à la recherche en archéologie

Study of a structure dedicated to 3D data production and exploration applied to research in archaeology

Jean-Baptiste Barreau¹, Ronan Gaugne², Gaétan Le Cloirec³, Yann Bernard⁴, Valérie Gouranton⁵, Bruno Arnaldi⁵

¹ CNRS / UMR 6566 CReAAH - INSA Rennes / UMR 6074 IRISA / Inria, ingénieur d'étude, jean-baptiste.barreau@univ-rennes1.fr

² Université de Rennes 1 / UMR 6074 IRISA / Inria, ingénieur de recherche, ronan.gaugne@irisa.fr

³ Inrap / UMR 6566 CReAAH, ingénieur de recherche, gaetan.le-cloirec@inrap.fr

⁴ Virtual-Archéo / UMR 6566 CReAAH, ingénieur 3D, yann.bernard@univ-rennes1.fr

⁵ INSA Rennes / UMR 6074 IRISA / Inria, valerie.gouranton@irisa.fr, bruno.arnaldi@irisa.fr

RÉSUMÉ. Le Conservatoire Numérique du Patrimoine Archéologique de l'Ouest (CNPAO) est un organisme de recherche français dont l'objectif général est d'assurer la conservation des données archéologiques numériques, et de fournir une expertise en matière de production, d'analyse, de visualisation et de techniques d'exploration en réalité virtuelle. Créé au sein du Centre de Recherche en Archéologie, Archéosciences, Histoire (CReAAH – UMR6566), ce projet interdisciplinaire est composé d'ingénieurs et de chercheurs en archéologie, informatique, réalité virtuelle et interactions 3D en environnements virtuels. Sa première mission consiste à accompagner le scientifique dans ses travaux de recherche, à travers un large éventail de méthodes de génération de données 3D. Parallèlement grâce à une collaboration avec l'Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires (IRISA), le CNPAO a pu explorer et illustrer l'intérêt de la réalité virtuelle à différentes étapes du travail de l'archéologue pour : (i) l'analyse scientifique et la compréhension des contextes archéologiques, (ii) la validation de certaines hypothèses, l'argumentation et la démonstration, (iii) la diffusion à des fins éducatives et de médiation scientifique.

Après trois ans d'existence, le CNPAO propose de faire le point sur son organisation et son mode de fonctionnement. Il est en effet apparu que le positionnement de la structure, sa proximité, son adaptabilité et ses échanges avec les archéologues ont eu un impact sur le processus scientifique tout aussi important que l'efficacité intrinsèque des outils d'imagerie 3D. L'évolution rapide de ces derniers, à la fois en terme de numérisation de l'existant et de modélisation de l'hypothétique, implique certaines difficultés qui peuvent avoir des impacts scientifiques et économiques importants pour une discipline qui n'est ni toujours familiarisée avec ces technologies, ni invariablement à même de les financer.

Des expériences du CNPAO, des tendances se sont dégagées et concernent un large spectre technologique, allant du stockage numérique à l'interaction en réalité virtuelle, en passant par la reconstitution 3D de bâtiments, d'environnements écologiques et d'activités humaines. Ces orientations sont relatives à des choix méthodologiques tels que le positionnement de l'archéologue, de l'ingénieur 3D ou du graphiste, les financements, les réponses possibles aux questions archéologiques et la valorisation du patrimoine culturel. Sur la base de l'expérience du CNPAO, nous proposons d'identifier et de caractériser ces constantes afin de les partager avec la communauté et d'accompagner les archéologues dans l'univers de l'archéologie numérique 3D.

ABSTRACT. The West Digital Conservatory of Archaeological Heritage project, a.k.a. WDCAH, is a French research organization whose aim is to both ensure the preservation of digital archaeological data, and deliver expertise in production, analysis, visualization and virtual reality exploration techniques. He was created three years ago in the CReAAH (Research Center for Archaeology, Archeosciences and History). This project is an interdisciplinary project composed of engineers and researchers in archaeology, computer science, virtual reality and 3D interaction with virtual environments. Its purpose is to help the scientist in his research work through a wide range of 3D data generation methods. In addition, through a collaboration with IRISA (Institute of Research in Computer Science and Random Systems), the WDCAH explored and illustrated the interest of virtual reality at different stages of the archaeologist work: (i) for scientific analysis and understanding of archaeological contexts, (ii) to validate certain hypotheses, argue and demonstrate and (iii) to disseminate for educational purposes and scientific mediation. After three years of existence, the

WDCAH proposes to take stock of its organization and mode of operation. It appeared that the positioning of the WDCAH structure, its proximity, adaptability and exchange with archaeologists had an impact on the scientific process as important as the intrinsic efficiency of 3D imaging tools. The rapid evolution of these tools, both in terms of digitization of existing and hypothetical modeling involves some difficulties that may have significant scientific and economic impacts for a discipline that is not always familiar with these technologies and does not necessarily have the financial means to spend. From the work of the WDCAH, constants have emerged on a broad technical spectrum, from digital storage to virtual reality interaction through the 3D reconstruction of buildings, ecological environments and human activities. But these constants also concern methodological choices as the positioning of the archaeologist, 3D engineer, or graphic designer, funding, possible responses to archaeological issues and participation in the evaluation of cultural heritage. Based on the experience of WDCAH, we propose to identify and characterize these constants to share with the community and help archaeologists access to 3D digital archeology.

MOTS-CLÉS. Archéologie, Réalité virtuelle, Patrimoine, Immersion, Interaction.

KEYWORDS. Archaeology, Virtual Reality, 3D Digitization, Digital for Cultural Heritage.

Introduction

La production et la gestion des données numériques 3D dans le domaine du patrimoine culturel constituent un défi majeur, car ce type de données fait désormais partie des processus standards. Afin d'aider les acteurs de ce domaine à accéder à de nouvelles méthodes, outils et pratiques, plusieurs infrastructures ont été déployées du niveau local au niveau international. À l'échelle nationale, l'infrastructure française Huma-Num (Renneville 2015) vise à faciliter l'accès aux données numériques pour toutes les sciences humaines et leurs acteurs. Concernant les données 3D, Archéovision (Vergnieux 2011 : 39-43) est une infrastructure dédiée qui produit et gère ces données concernant notamment le patrimoine culturel français. Ce type d'infrastructure occupe une place importante, car elle permet un développement de l'accès aux technologies 3D par des outils et méthodes adaptés aux différents besoins et exigences. Parmi l'international, nous pouvons surtout citer Ariadne qui incarne un rôle fédérateur. Un aperçu des différents types et niveaux d'infrastructures, et de la façon dont ils sont reliés à Ariadne, est présenté dans (Aspöck 2013 : 1-10).

Contexte

Le Conservatoire Numérique du Patrimoine Archéologique de l'Ouest (CNPAO) est un organisme de recherche française composé d'ingénieurs et de chercheurs en archéologie, informatique, réalité virtuelle et interactions 3D en environnements virtuels. Il regroupe principalement deux laboratoires de recherche de l'Ouest de la France: le CReAAH, un centre de recherche en archéologie, archéosciences et histoire, et l'IRISA, un institut de recherche en informatique. Le CReAAH-UMR6566 regroupe 102 personnels permanents et 38 doctorants. Il s'intéresse particulièrement à la relation entre les humains et leur environnement, notamment sur les milieux littoraux. L'IRISA-UMR6074 rassemble 750 personnes au sein de 40 équipes de recherche et étudie le monde des sciences numériques pour trouver des applications dans les domaines de la santé, l'écologie/environnement, la cybersécurité, le transport, le multimédia, le patrimoine culturel, et l'industrie.

Le CNPAO présente ainsi quatre vocations majeures, en accord avec la charte de Londres (www.londoncharter.org) :

1. La sauvegarde et l'archivage pérennes et centralisés des données 2D et 3D produites par la communauté archéologique de l'ouest.
2. L'accès gratuit aux métadonnées (directive INSPIRE)
3. L'accès sécurisé aux données pour les différents acteurs impliqués par les projets scientifiques ou concernant la valorisation du patrimoine.

4. L'accompagnement et le conseil de ces acteurs dans les démarches de production/exploration de données archéologiques 3D par le biais des dernières techniques de numérisation, de modélisation et de réalité virtuelle.

Fonctionnement de la structure

Le Conservatoire Numérique du Patrimoine Archéologique de l'Ouest a d'abord été pensé comme un outil pratique, facile d'accès et gratuit pour les archéologues de l'Ouest de la France. Il a ensuite évolué comme projet de recherche proposant de nouvelles méthodes, processus et outils pour les archéologues.

Concernant la production, les modèles 3D sont réalisés dans le cadre d'un processus itératif souple centré sur la méthodologie scientifique des archéologues et la fidélité vis-à-vis de leurs dernières hypothèses (Barreau 2013 : 547-554). Parallèlement, l'accès aux méthodologies et environnements de réalité virtuelle est proposé comme une pratique novatrice permettant d'améliorer le travail de recherche. La réalité virtuelle est ici considérée comme un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel les comportements d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs (Arnaldi 2003). En fonction des besoins, plusieurs outils et équipements interactifs de réalité virtuelle sont proposés, principalement associés à de la visualisation immersive et de l'interaction à l'échelle 1:1 (Gaugne 2014 :1-10). La première possibilité d'interaction proposée est la navigation au travers de différents périphériques et métaphores, telles que la marche naturelle, le vol et la téléportation à des points d'intérêt. D'autres outils interactifs permettent l'analyse des reconstitutions numériques de sites en proposant de se concentrer sur certaines parties de l'univers virtuel en les surlignant, masquant certaines parties, ou affichant progressivement des étapes de construction. Des informations supplémentaires peuvent aussi être ajoutées à l'intérieur de l'univers virtuel sous la forme de textes et annotations symboliques (Barreau 2014 : 1-4). Des interactions avancées avec des objets tangibles sont également développées grâce à de l'impression 3D combinée avec de la réalité virtuelle (Nicolas 2015 : 265-277). Enfin, la réalité virtuelle peut proposer différentes simulations du comportement de l'environnement, pour une meilleure analyse et compréhension (Barreau 2015 : 117-122) (Barreau 2015 : 201-219), ainsi qu'un support précieux pour de la médiation scientifique (Gaugne 2013 : 75-80).

Présentation du corpus

Le corpus actuel du CNPAO est constitué de 62 études de différents sites, principalement situés dans l'Ouest de la France (cf. figure 1).

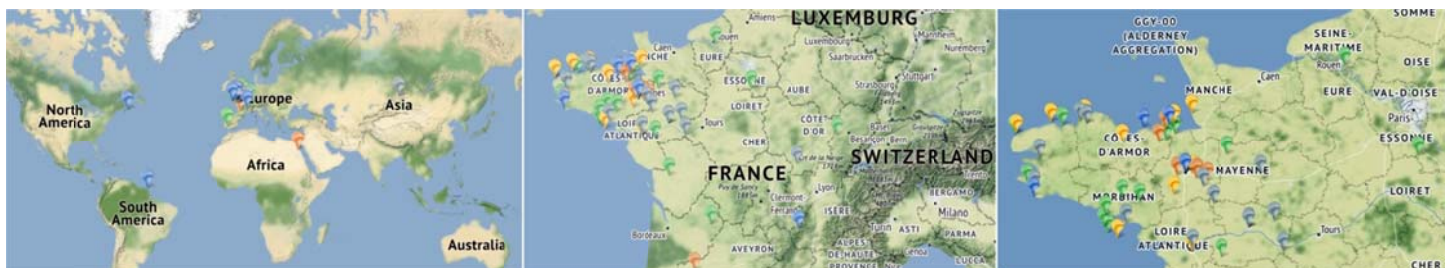


Figure 1. Répartition géographique des sites du corpus

Afin de classer les sites suivant des ordres de grandeur de quantités de travail lié à la production des modèles 3D, 10 types ont été identifiés : cavité souterraine naturelle, zone de fouille archéologique, mégalithe et amas artificiel de pierres, grande zone littorale, objet, bâtiment, agglomération de bâtiments, structure défensive, sépulture et navire (cf. figure 2).



Figure 2. Typologie expérimentale des sites du corpus

Le corpus couvre aussi les périodes suivantes :

- Préhistoire : 18  l ments
- Protohistoire : 10  l ments
- Antiquité : 8  l ments
- Moyen âge : 19 éléments
- Histoire moderne : 7 éléments

Parmi les 62 projets du corpus, 42 ont entièrement été couverts par le CNPAO et 20 ont été entamés par des producteurs 3D extérieurs, puis repris par le CNPAO. 38 archéologues différents les ont guidés. De 2013 à 2015, un financement européen d'un an a d'abord permis le développement d'un grand nombre de projets simultanés, notamment grâce au recrutement d'un infographiste 3D. Après cette période de lancement, le CNPAO a reçu divers financements locaux, chacun correspondant presque toujours à un unique projet, ce qui a réduit la durée des productions (cf. figure 3). Ce gain de temps s'explique également par l'expérience acquise des producteurs 3D et archéologues impliqués.

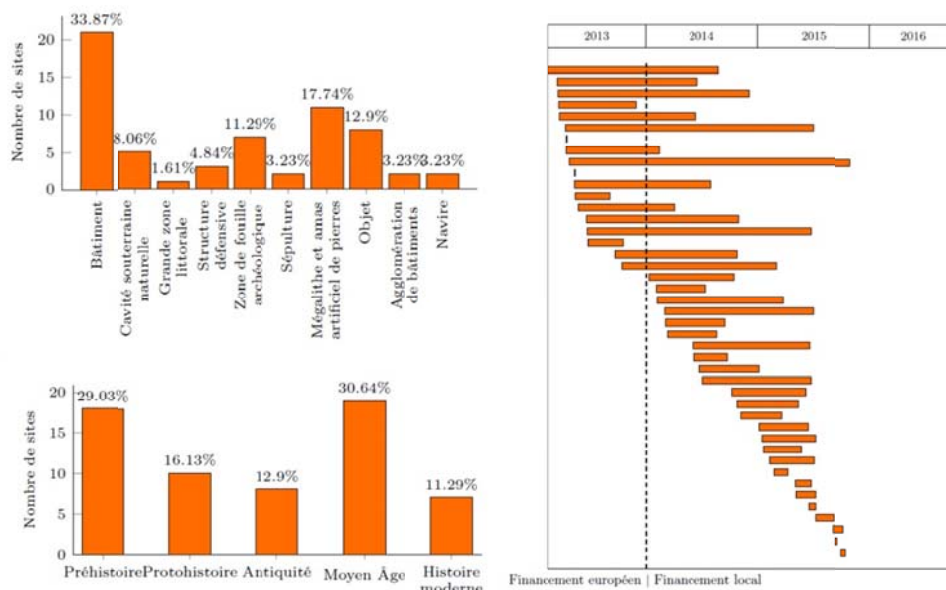


Figure 3. Répartitions typologiques, chronologiques et diagramme de gantt

Analyse des données

Les projets ont été initiés par des archéologues présentant des objectifs et besoins différents, allant de l'appui scientifique à la valorisation. Les variables prises en compte pour l'analyse des données de corpus sont les suivantes : numérisation (oui / non), durée de numérisation (nombre de jours), nombre de stations de scan laser (dans le cas de l'utilisation d'un scan laser), modélisation (oui/ non), nombre de rendus (nombre d'images fournies aux archéologues et /ou au grand public), type de rendu, nombre de périodes concernées par la restitution, taille du répertoire de travail (Go), nombre de fichiers, taille du fichier 3d final (Go), durée de production de fichiers (nombre de jours), durée des échanges avec les archéologues (nombre de jours), nombre d'e-mails, nombre d'acteurs impliqués, publication scientifique (oui/non), réalité virtuelle (oui/ non), valorisation (oui/non). Selon le cas, le projet implique soit des techniques de numérisation 3D, de modélisation 3D, ou un mélange des deux. Il est moins chronophage de numériser des parties existantes que de modéliser des parties hypothétiques. Le nombre de sites numérisés est donc plus important. Neuf productions 3D sont basées sur des numérisations de parties existantes combinées à de la modélisation de parties hypothétiques.

Numérisation

Le processus de numérisation peut se baser sur diverses technologies. Nous avons utilisé la photogrammétrie, le scan laser et la tomographie en fonction des caractéristiques des sites traités. La tomographie est utilisée pour fournir des informations sur la constitution interne d'un matériel archéologique. Pour couvrir des sites archéologiques dans leur ensemble, le scanner laser est systématiquement utilisé, notamment car sa location à un prix réduit a été rendue possible par le biais d'un partenariat de mutualisation établi entre le CNPAO et un laboratoire de géologie. La tomographie est essentiellement utilisée pour des objets. La photogrammétrie est bien adaptée aux petites structures comme les petites cavités souterraines et sépultures du corpus. Les scans Leica ScanStation et Faro Focus 3D X330 ont été utilisés pour les sites de plus grande envergure. Pour les mégalithes et amas artificiels de pierres du corpus, photogrammétrie et/ou scan laser ont été utilisés en fonction de la taille des structures (Barreau 2013 : 547-554) (Bueno Ramirez 2015 : 55-71). Cette double utilisation a également été pratiquée pour une épave dans un contexte d'estran (Hulot 2015 : 131-138). La durée moyenne d'une opération de numérisation 3D est d'un peu plus d'un jour et demi. Le scan laser d'un bâtiment nécessite plus de stations que d'autres sites, notamment quand l'extérieur et l'intérieur sont traités (cf. figure 4).

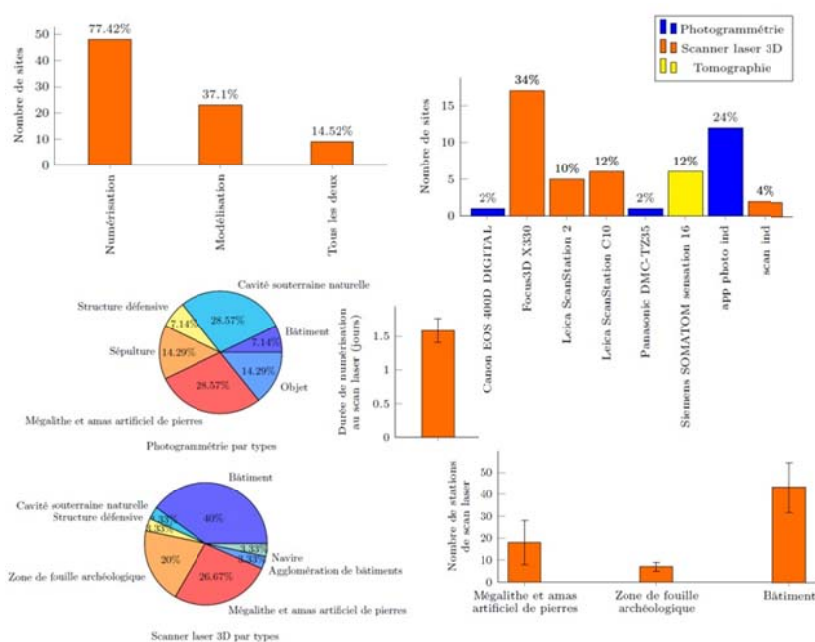


Figure 4. Répartitions des variables concernant les numérisations

Modélisation

Bien que la plupart des archéologues se soient intéressés à une seule période de reconstitution, d'autres ont souhaité travailler sur plusieurs phases chronologiques. En effet, lorsque les sites ont une longue durée de vie, ils subissent inévitablement de nombreuses transformations (cf. figure 5).

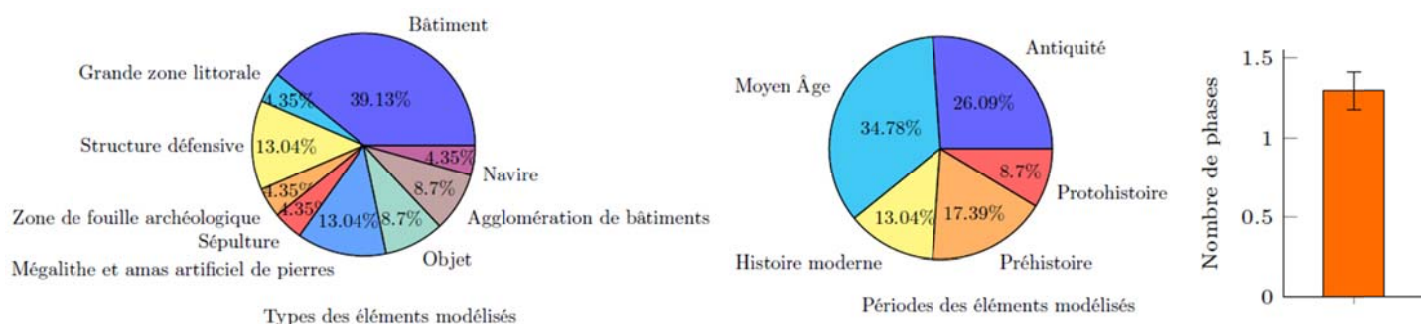


Figure 5. Répartitions des variables concernant les modélisations

Rendus

À partir du corpus, nous pouvons distinguer cinq types de rendus répondant aux demandes des archéologues (cf. figure 6) :

1. Section 3D : Coupe 3D dans un nuage de points 3D afin d'isoler une zone d'intérêt
2. Section transversale : Intersection d'un plan et d'un nuage de points 3D
3. Ortho-image : Vue orthographique d'une zone d'intérêt au sein d'un nuage de points 3D.
4. Rendu photo-réaliste : Image calculée par un moteur de rendu photoréaliste précisément paramétré à partir un modèle 3D texturé
5. Rendu schématique : Image calculée par un moteur de rendu à partir d'un modèle 3D non texturé



Figure 6. Typologie expérimentale des rendus fournis aux archéologues (© Y. Bernard / JB. Barreau)

Pour chaque projet, plusieurs rendus peuvent être produits en fonction de différents objectifs et leur nombre moyen est d'un peu plus de 4. Ce nombre est plus élevé dans le cas de reconstitutions hypothétiques que pour des numérisations d'existant. Certains de ces rendus sont spécifiquement produits pour des publications scientifiques et d'autres pour la valorisation. En raison du nombre important de numérisations, il y a un grand nombre de sections 3D. En termes de périodes chronologiques, leur distribution reste globalement homogène suivant le type de rendu. La prédominance de sites préhistoriques et médiévaux influence cette distribution. Un rendu photoréaliste nécessite davantage d'échanges scientifiques, et ce sur une période plus longue. La taille du fichier final dans le cas d'un rendu schématique est extrêmement faible par rapport aux autres types (cf. figure 7).

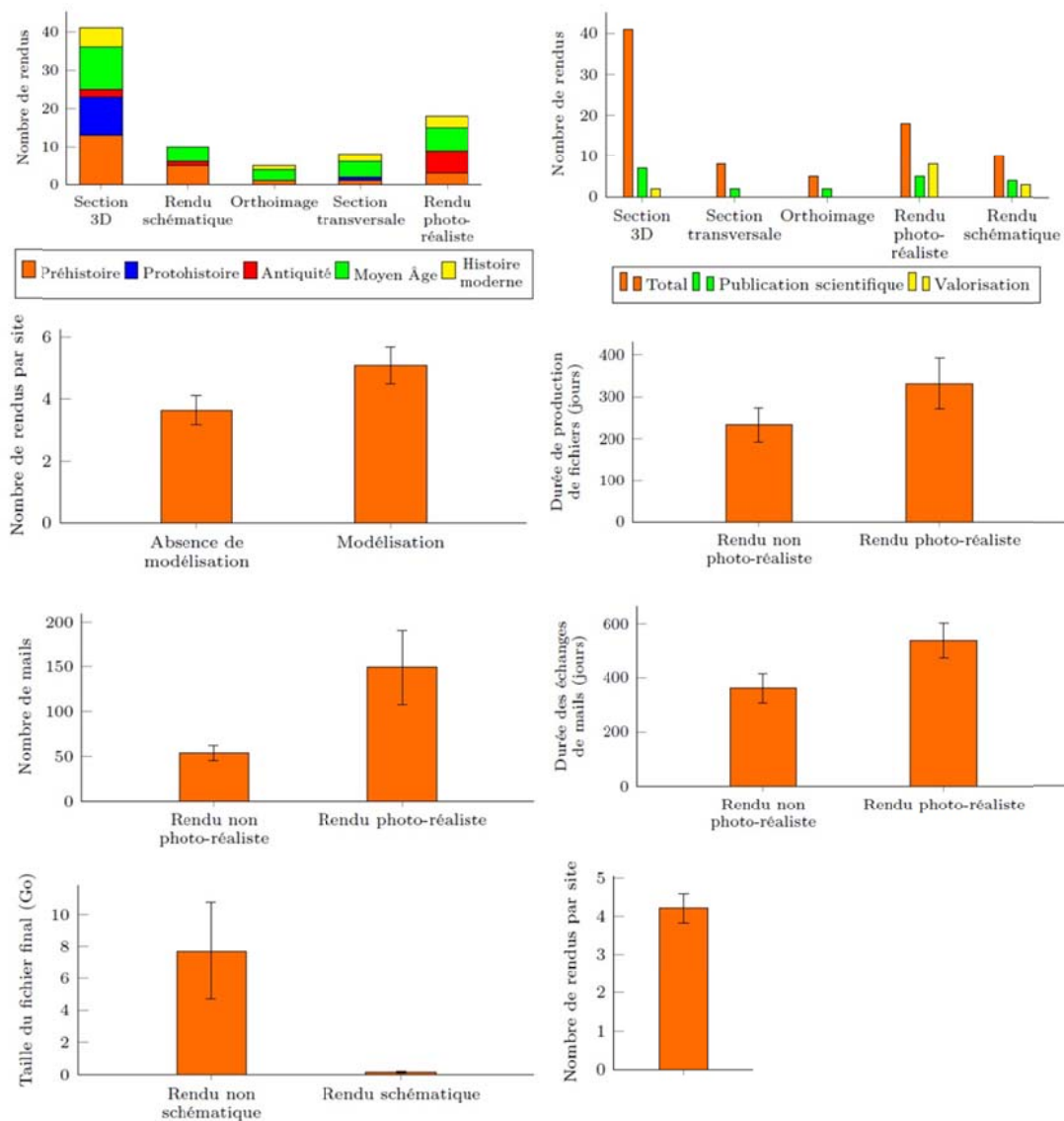


Figure 7. Répartitions des variables concernant les rendus

Métriques organisationnelles

Le stockage constitue une question majeure pour toute structure produisant des données 3D. Actuellement, le répertoire d'un projet du CNPAO a une taille moyenne de 25 Go tandis que le fichier 3D final a une taille moyenne de 6Go qui représente environ 15 % du répertoire de travail. L'ensemble des données représente plus de 1,5 To. Dans le cas d'une numérisation, les tailles du répertoire et du fichier final sont significativement plus élevées. Il y a en moyenne 900 fichiers par projet qui peuvent être des nuages de points, des maillages, des textures, des fichiers relatifs à un logiciel d'infographie 3D, des rendus, ou quelconques documents archéologiques. Un rendu photo-réaliste implique la génération d'une importante quantité de fichiers, car il nécessite des textures, des objets modélisés en interne ou issus de bibliothèques, afin d'enrichir la scène, et ce pour plus de réalisme. Il y a aussi de nombreuses versions du rendu en raison du niveau élevé d'exigence de l'archéologue.

Concernant les échanges scientifiques, leur durée est plus longue que celle de la production en tant que telle du fait de l'importance des pré- et post-discussions avec les archéologues. Les restitutions de l'hypothétique impliquent également de plus longues durées de production. Le nombre moyen de messages envoyés par site est d'environ 90 et ceux-ci concernent de 5 à 6 personnes. Parmi les sites concernés par une intégration en réalité virtuelle, 8 types d'interactions se dégagent. Ces intégrations ont impliqué l'implémentation d'un ou plusieurs types d'interactions. Quand une application de réalité virtuelle autour de la reconstitution est développée, les durées de production de fichiers et le nombre de

personnes impliquées sont plus élevés. Dans le cas d'une publication scientifique, les durées de production de fichiers sont considérablement plus longues (cf. figure 8).

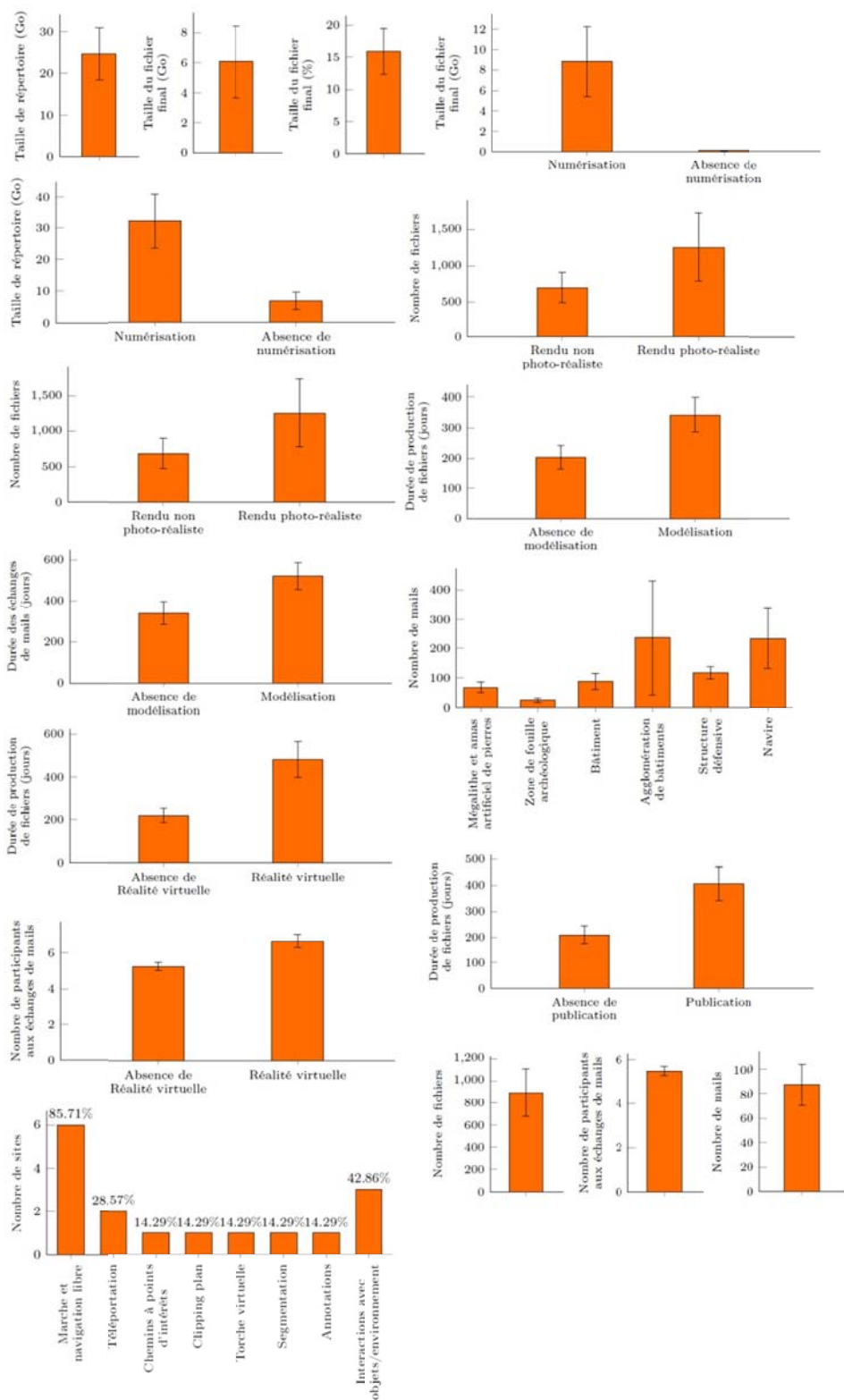


Figure 8. Répartitions des variables organisationnelles

Discussion

Les trois années d'existence du CNPAO ont permis de constituer un corpus de 62 projets de différents types et relatifs à différentes époques. Il ressort tout d'abord de cela que la composition de ce corpus, les périodes chronologiques, les types et domaines archéologiques liés dépendent complètement de l'environnement scientifique dans lequel baigne la structure de production.

Concernant les moyens de numérisation, les possibilités de location bon marché et de mutualisation d'un scanner laser 3D permettent une liberté de traitement d'un large éventail de sites. La prise en compte du fait que leur type affecte le nombre de stations de scan laser permet une organisation en amont non négligeable. L'utilisation systématique et simultanée de la photogrammétrie et de la tomographie pour des numérisations intérieures et extérieures d'objets archéologiques offre des apports scientifiques majeurs. Les rendus de sections 3D de nuages de points sont faciles à mettre en œuvre et constituent de bons documents de travail. Les possibilités récentes d'intégrations directes de nuages de points au sein des logiciels de modélisation 3D permettent des reconstitutions hypothétiques à partir d'éléments existants scientifiquement très efficaces. Les longues durées de discussions préparant et clôturant les projets permettent souvent de travailler simultanément sur plusieurs sites. La variété des sites permet des développements de types d'interactions en réalité virtuelle hétérogènes allant de la navigation « simple » aux interactions fines avec objets et environnements. Concernant les objectifs, le volume de production de rendus, de publications scientifiques et de démarches de valorisation sont interdépendants. La médiation favorise les rendus photo-réalistes qui nécessitent un travail chronophage, mais non sans fondement scientifique lorsqu'il est bien guidé par l'archéologue.

Conclusion

L'expérience développée par le CNPAO est désormais reconnue dans le Grand Ouest français et a insufflé la création d'une entreprise répondant aux besoins croissants de la communauté archéologique¹. Grâce à une pleine collaboration avec un laboratoire d'informatique (Gaugne 2014 : 1-10), sa capacité à proposer de nouvelles méthodes et outils pertinents basés sur la réalité virtuelle, la tomographie et l'impression 3D amène des réflexions sur l'évolution du métier d'archéologue. Fort de cette philosophie, le CNPAO va poursuivre son accompagnement des archéologues locaux tout en développant une activité de recherche internationale au travers de projets de recherche.

RÉFÉRENCES

- ARNALDI, B., P. FUCHS, J. TISSEAU, 2003. *Le traité de la réalité virtuelle*. Paris, Les Presses de l'École des Mines, 550p.
- ASPÖCK, E., G. GESER, 2013. « What is an archaeological research infrastructure and why do we need it? », in : W. Börner & S. Uhlirz (éds), *Aims and challenges of ARIADNE. Proceedings of 18th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies*. Vienna: 1-10.
- BARREAU, J-B., Y. BERNARD, R. GAUGNE, G. LE CLOIREC, V. GOURANTON, 2013. « The West Digital Conservatory of Archaeological Heritage project », in : *Proceedings of Digital Heritage International Congress*. Marseille : 547-554.
- BARREAU, J-B., R. GAUGNE, Y. BERNARD, G. LE CLOIREC, V. GOURANTON, 2014. « Virtual reality tools for the west digital conservatory of archaeological heritage », in : *Proceedings of the 2014 Virtual Reality International Conference*. Laval : 1-4.
- BARREAU, J-B., F. NOUVIALE, R. GAUGNE, Y. BERNARD, S. LLINARES, V. GOURANTON 2015. « An immersive virtual sailing on the 18th-century ship le boullongne », *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 24, 3 : 201-219.
- BARREAU, J-B., Q. PETIT, Y. BERNARD, R. AUGER, Y. LE ROUX, R. GAUGNE, V. GOURANTON , 2015. « 3D reconstitution of the loyola sugar plantation and virtual reality applications », in : *Proceedings of Computer Applications & Quantitative Methods in Archaeology, CAA*. Sienna : 117-122.
- GAUGNE, R., J-B. BARREAU, G. LE CLOIREC, V. GOURANTON, 2013. « Experiencing the past in virtual reality: A virtual reality event for the french national days of archaeology », in : *Cognitive Infocommunications (CogInfoCom), IEEE 4th International Conference* Budapest : 75-80.

¹ L'entreprise Virtual-Archéo (virtual-archeo.com) a été créée au printemps 2016
© 2017 ISTE OpenScience – Published by ISTE Ltd. London, UK – openscience.fr

- GAUGNE, R., V. GOURANTON, G. DUMONT, A. CHAUFFAUT, B. ARNALDI, 2014. « Immersia, an open immersive infrastructure: doing archaeology in virtual reality », *Archeologia e Calcolatori*, 5 : 1-10.
- HULOT O., M. JAOUEN, J-B. BARREAU, Y. BERNARD, Q. PETIT, R. GAUGNE, V. GOURANTON, 2015. "Study of a wreck in Foreshore Context", *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 5 : 131-138.
- NICOLAS, T., R. GAUGNE, C. TAVERNIER, Q. PETIT, V. GOURANTON, B. ARNALDI, 2015. « Touching and interacting with inaccessible cultural heritage », *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 24, 3 : 265-277.
- RAMIREZ, PB., R. DE BALBIN BEHRMANN, L. LAPORTE, P. GOUEZIN, F. COUSSEAU, RB. BERMEJO, AH. GISMERO, MI. CELA, L. QUESNEL, 2015. « Natural and artificial colours: the megalithic monuments of Brittany », *Antiquity*, 89, 343 : 55-71.
- RENNEVILLE, M., S. POUYLLAU, 2015. « Rapport intermédiaire TGIR 2013-2015 », *Huma-Num*, <http://www.humanum.fr/sites/default/files/Rapport-activite-2013-2015.pdf>
- VERGNIEUX, R. 2011. « Archaeological research and 3D models (Restitution, validation and simulation) », *Virtual Archaeology Review*, 2, 4 : 39-43.