



HAL
open science

De la tomographie à l'interaction 3D en eXtended Reality

Ronan Gagne, Valérie Gouranton

► **To cite this version:**

Ronan Gagne, Valérie Gouranton. De la tomographie à l'interaction 3D en eXtended Reality. Les Nouvelles de l'archéologie, 2020, 159, pp.79-84. 10.4000/nda.9662 . hal-03102846

HAL Id: hal-03102846

<https://hal.science/hal-03102846v1>

Submitted on 7 Jan 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

De la tomographie à l'interaction 3D en *eXtended Reality*

Ronan Gaugne¹ & Valérie Gouranton²

¹Ingénieur de recherche à l'Université de Rennes 1.

²Maître de conférences à l'INSA DE RENNES « Institut national des sciences appliquées »

UMR IRISA / INRIA Rennes – Bretagne Atlantique « Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires / Institut national de recherche en informatique et en automatique – Campus universitaire de Beaulieu, avenue du Général-Leclerc – 35042 RENNES Cedex.

Ronan.Gaugne@irisa.fr, Valerie.Gouranton@irisa.fr

Résumé

La tomodensitométrie, technique d'imagerie médicale basée sur les rayons X, est de plus en plus utilisée en archéologie. Toutefois, son utilisation reste le plus souvent limitée à la production d'images 2D ou 3D. Au-delà de ces modes de visualisation des données, il convient de s'interroger sur les possibles interactions, contextes et usages qu'il est possible de mettre en œuvre. La réalité augmentée et la réalité virtuelle ou XR pour *eXtended Reality*, permettent d'envisager des interactions naturelles et complexes avec les environnements numériques en 3D basés sur des données issues de la tomodensitométrie, en donnant accès à leur structure interne. L'opérateur peut appréhender ces interactions physiques, tangibles ou encore haptiques – du grec *haptikós*, tactile –, à travers différentes modalités et métaphores, associées à des procédures ou des gestes qui lui permettent d'agir sur l'environnement virtuel, constitué d'un ensemble d'informations. La méthodologie et les concepts présentés dans cet article illustrent différents contextes interactifs en environnement XR. Ils résultent d'une collaboration entre l'Inrap, le Centre de recherche en archéologie, archéosciences, histoire (CREAAH) de et l'Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires (IRISA).

Mots-clefs : réalité virtuelle, réalité augmentée, *eXtended Reality*, interaction, immersion

Abstract

Computed tomography, an X-ray based medical imaging technique, is increasingly used in archeology. However, its use is most often limited to the production of 2D or 3D images. Beyond these data visualization modes, it is necessary to question the possible interactions, contexts and uses that it is possible to implement. Augmented reality and virtual reality, or XR for *eXtended Reality*, make it possible to envisage natural and complex interactions with digital 3D environments based on data from computed tomography, by giving access to their internal structure. The operator can understand these physical, tangible or haptic interactions - from the Greek *haptikós*, tactile -, through different modalities and metaphors, associated with procedures or gestures that allow him to act on the virtual environment, made up of a set of information. The methodology and concepts presented in this article illustrate different interactive contexts in the XR environment. They are the result of a collaboration between Inrap, the Center for Research in Archeology, Archeosciences, History (CREAAH) and the Institute for Research in Computer Science and Random Systems (IRISA).

Keywords : Virtual reality, augmented reality, *eXtended Reality*, interaction, immersion

Présentation du cadre de recherche

Les travaux de l'équipe de recherche [Hybrid](#), commune au centre [Inria Rennes Bretagne Atlantique](#)¹ et à l'[UMR IRISA](#)², concernent la réalité virtuelle et la réalité augmentée ou *eXtended Reality*, abrégée XR. Il s'agit de concevoir de nouvelles techniques d'interaction 3D avec les environnements virtuels, basées

¹ <https://www.inria.fr/fr/centre-inria-rennes-bretagne-atlantique>

² <http://www.irisa.fr/>

sur les activités motrices (captures de mouvement) et mentales (interfaces cerveau-ordinateur) de l'utilisateur. Les objectifs scientifiques sont la modélisation et la simulation de scènes 3D complexes, la constitution de nouveaux paradigmes d'interactions humain-machine 3D et l'analyse des retours multi-sensoriels (algorithmes de rendu).

Les applications de ce programme de recherche sont multiples et concernent différents domaines : l'industrie (prototypage virtuel), la médecine (simulateurs chirurgicaux, réhabilitation et rééducation), l'architecture (maquettes), l'art numérique, le patrimoine culturel, le web (applications 3D), les jeux vidéo...

Les travaux présentés ici sont issus d'une collaboration entre l'IRISA, l'Inrap et le CReAAH, notamment à travers les projets CNRS Imagin IRMA et ANR-FRQSC INTROSPECT. Ce dernier est présenté dans la suite de cet article. Les méthodes et concepts présentés ici s'appuient sur les publications (Gaugne & Gouranton 2019c), (Nicolas et al. 2014), (Nicolas et al. 2016a), (Nicolas et al. 2016b), (Lécuyer et al. 2018) et (Gaugne et al. 2019b).

Quelques définitions

La réalité virtuelle (RV) est un « domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et les dispositifs d'interaction en vue de simuler, dans un environnement virtuel, le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou plusieurs utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs » (Arnaldi *et al.* 2003). Dans ce domaine, des simulations numériques sont réalisées afin de représenter en 3D des univers réalistes, symboliques ou imaginaires, avec lesquels un ou plusieurs utilisateurs interagissent en utilisant leurs capacités sensorimotrices en activité réelle. Ainsi, ce n'est pas seulement l'esprit mais bien l'ensemble du corps qui est immergé dans l'univers numérique. Pour exemple, la figure 1, à gauche, présente un utilisateur en immersion dans la reconstitution d'un bâtiment, en train d'interagir avec des éléments de la scène virtuelle (Gaugne *et al.* 2019a).



Fig. 1. Interactions en environnements de réalité virtuelle, à gauche, et de réalité augmentée, à droite © IRISA.

La réalité augmentée (RA) est un « domaine des applications qui combinent le réel et le virtuel, en temps réel et donnent l'apparence que les objets virtuels et réels cohabitent dans le même monde tridimensionnel » (Azuma 1997). Elle augmente la visualisation de la réalité avec des données numériques et permet à l'utilisateur d'interagir avec l'environnement. Sur la figure 1, à droite, l'utilisateur regarde un objet avec un système de réalité augmentée projective qui projette des données sur cet objet (Gaugne *et al.* 2019b).

Ces différents domaines de la réalité mixte sont présentés dans le continuum de Milgram (fig. 2), où l'on part des environnements réels pour aller vers les environnements virtuels en passant par la réalité augmentée (Milgram & Kishino 1994).



Fig. 2. Continuum de Milgram. © Milgram & Kishino 1994.

Méthodologie

Le projet INTROSPECT

Financé par les Fonds de recherche Société & Culture du Québec et l'Agence nationale de la recherche française, le projet [INTROSPECT³](http://introspect.info/) (Introspection du mobilier archéologique à l'ère du numérique) propose de combiner des technologies 3D et d'imagerie médicale afin de concevoir de nouveaux usages archéologiques. Il regroupe des archéologues, des informaticiens, des musées, en France et au Québec.

La méthodologie générale est présentée dans la figure 3. La première étape concerne la numérisation du matériel archéologique en contexte permettant de produire des données pour en représenter certaines propriétés telles que sa géométrie spatiale, la manière dont elle réfléchit la lumière, ou encore sa réaction aux rayons X. Pour cela, nous utilisons différentes techniques en fonction des contraintes du contexte archéologique étudié, telles la photogrammétrie (Nicolas *et al.* 2015 ; Barreau *et al.* 2014, 2015), la lasergrammétrie (Barreau *et al.* 2014, 2017 ; Gaugne *et al.* 2019), la *Reflectance Transformation Imaging* (RTI) (Kinsman 2016) ou la tomodensitométrie (Nicolas *et al.* 2018 ; Gaugne *et al.* 2018). Les données numériques obtenues, qu'il s'agisse de photos, de nuages de points ou d'images Dicom, font ensuite l'objet de traitements pour produire des données 3D.

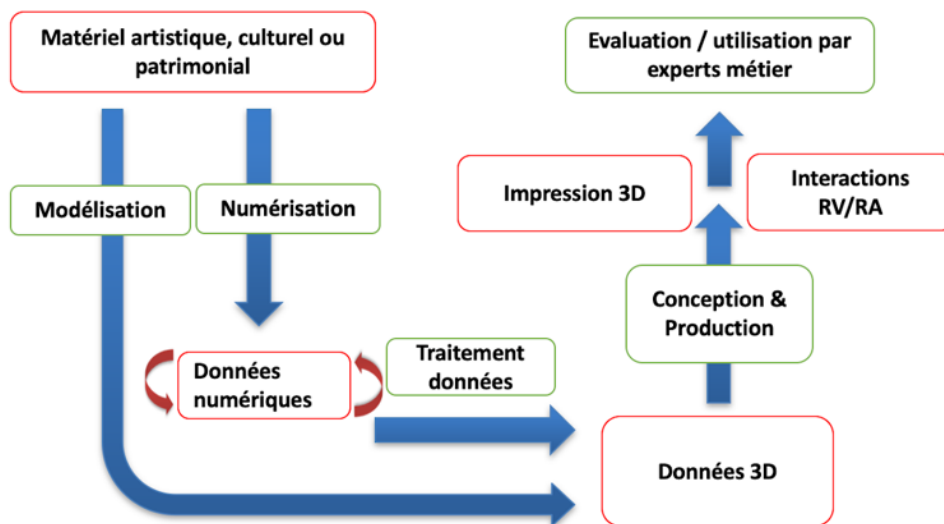


Fig. 3. Méthodologie générale. © Introspect

³ <http://introspect.info/>

En général, le recours aux technologies 3D dans les chaînes opératoires en archéologie s'arrête à cette étape. Les archéologues travaillent soit directement sur ces données 3D, soit sur des rendus 2D de celles-ci. Pour les exploiter au mieux, nous proposons d'aller plus loin dans la démarche en concevant et développant des contextes interactifs en XR appuyés sur des applications de réalité virtuelle, augmentée ou mixte, et sur des techniques additives.

Technologies 3D interactives et tomodensitométrie pour l'archéologie

Les technologies 3D étudiées dans le projet INTROSPECT sont multiples et peuvent se combiner entre elles. Le choix de l'une ou l'autre dépend du cas d'usage visé et du matériel archéologique étudié. Par exemple, si le cas d'usage nécessite un contact direct avec l'objet réel, la réalité augmentée sera privilégiée mais, s'il implique des interactions complexes, on s'orientera plutôt vers la réalité virtuelle. L'impression 3D peut servir d'interface tangible pour une manipulation physique ou fournir la copie d'un objet fragile, pour mettre au point un protocole métier particulier, comme par exemple une opération de restauration ou de micro-fouille en laboratoire.

La tomodensitométrie s'intègre à ces technologies 3D grâce à des techniques de génération de modèles 3D à partir des données d'imagerie par rayons X. INTROSPECT aborde les problématiques de la représentation de ces données 3D et des interactions rendues possibles par les technologies 3D interactives, dans le contexte particulier de l'archéologie.

Pour expliciter notre propos, prenons pour exemple une urne funéraire de l'âge du Fer, découverte lors d'une fouille préventive menée par l'Inrap à Guipry, en Ille-et-Vilaine (Aubry *et al.* 2014). La tomodensitométrie a révélé qu'elle contenait, outre des fragments d'os, deux objets métalliques – une fibule et une lame de couteau. Dans un processus standard, ce type de matériel fait l'objet d'une fouille en laboratoire de plusieurs jours, activité destructrice qui rend impossible tout retour en arrière. En outre, elle est réalisée avec une connaissance limitée, voire nulle, des éléments sous-jacents dont certains ne peuvent être détectés au préalable et dont les traces seront détruites à la fouille. Enfin, une fois prélevé, le mobilier métallique doit à son tour faire l'objet de mesures de conservation et de restauration qui durent plusieurs mois.

Nous avons proposé plusieurs utilisations de technologies 3D basées sur les données obtenues par tomodensitométrie. Une fois celle-ci réalisée, il est en effet possible de générer, pour certains éléments du matériel source, des modèles 3D destinés à une impression 3D ou à faire l'objet de développements d'environnements interactifs en réalité mixte.

Compte tenu des données obtenues à la fouille, nous avons décidé de lancer une impression 3D de la fibule, le développement d'environnements expérimentaux de fouille virtuelle en réalité virtuelle et d'aide à la fouille réelle en réalité augmentée, ainsi qu'une impression 3D complexe de l'urne complète avec son contenu.

Impression 3D

L'impression 3D de la fibule, lancée dès que les données ont été disponibles (fig. 4, à gauche), a été obtenue en quelques heures. L'objet tangible obtenu (fig. 4, au centre) a permis l'identification typologique immédiate de l'artefact, sur laquelle reposent les premiers constats d'ordre morphologique, typo-métrique ou technologique, indépendamment des contingences dues aux nécessaires opérations de conservation et de restauration (Nicolas *et al.* 2014).



Fig. 4. À gauche, tomodensitométrie de l'urne ©Inrap/Image ET; au centre : Impression 3D de la fibule ©IRISA ; à droite : la fibule réelle avant et après restauration ©Inrap.

En parallèle, les archéologues ont décidé de fouiller l'urne afin d'en extraire la fibule et de la restaurer. La figure 4, à droite, la montre prise dans sa gangue de corrosion (en haut), puis après nettoyage (en bas). La copie obtenue, au centre, est très proche de la fibule restaurée qui, à l'observation, a révélé des marques d'ornement qui n'apparaissent ni sur la copie, ni dans les données obtenues par tomodensitométrie, car la gangue de corrosion empêchait leur détection.

La fouille de l'urne a entraîné sa destruction. Afin de conserver une trace tangible de sa structure spatiale interne, nous en avons produit une impression 3D transparente, laissant apparaître les fragments d'os et les deux artefacts métalliques qu'elle contenait (Nicolas *et al.* 2016b). Basée sur une technologie de fabrication additive par résine photosensible, cette impression complexe a abouti à une copie physique de l'urne initiale donnant accès à une représentation de sa structure interne. Cet objet peut désormais servir à l'identification et la classification de rites funéraires (fig. 5).

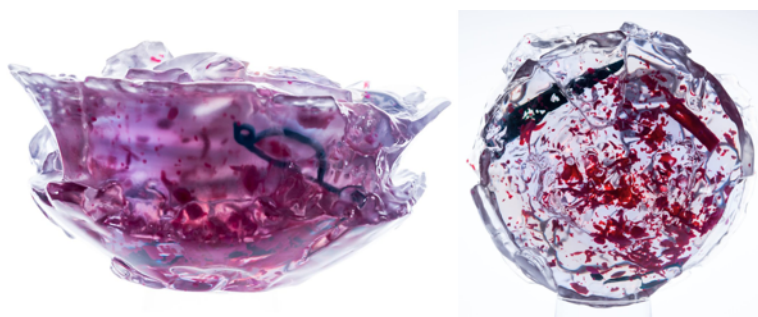


Fig. 5. Impression transparente de l'urne, vue de côté et de dessous. Les fragments d'os sont représentés en rouge et les objets métalliques en bleu. © IRISA

Environnement d'aide à la fouille réelle

La fouille réelle est une opération sur laquelle on ne peut revenir. Il est donc primordial de bien définir le protocole mis en œuvre, et de documenter au mieux son déroulement. Pour aider à sa préparation et sa réalisation, nous avons proposé un dispositif de réalité augmentée co-localisé avec l'objet réel : coiffé d'un casque de type *Hololens*, l'utilisateur peut visualiser l'intérieur de l'objet (fig. 6). Nous avons démontré dans (Gaugne *et al.*, 2019b) que ce mode de visualisation permet de localiser avec une bonne précision les éléments internes du matériel archéologique, avec une perception fine des différents plans de profondeurs. Le dispositif présenté ici s'appuie sur une copie de l'urne réalisée par impression 3D, mais il fonctionne dans les mêmes conditions sur du matériel archéologique réel.

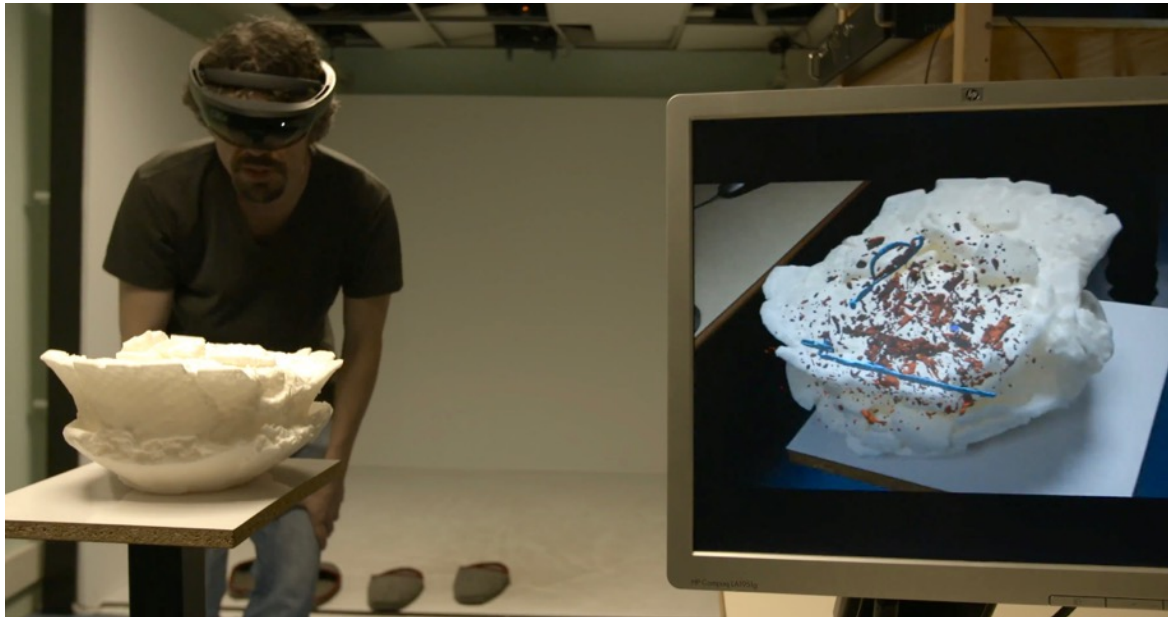


Fig. 6. Visualisation interne en réalité mixte. © IRISA.

Environnement de fouille virtuelle

Nous avons créé un environnement de fouille virtuelle (Lécuyer *et al.* 2018) pour préparer et documenter au mieux une opération archéologique, ou revenir a posteriori sur certains éléments du matériel original numérisé. Dans cet environnement virtuel, l'utilisateur peut retirer les objets de l'urne, les manipuler, les mesurer ou les annoter. Il peut également manipuler des plans de coupe afin d'en visualiser la structure interne. L'implémentation de l'application a été réalisée sur un environnement de type *Workbench* (fig. 7), le plus adapté à la petite dimension du matériel étudié.

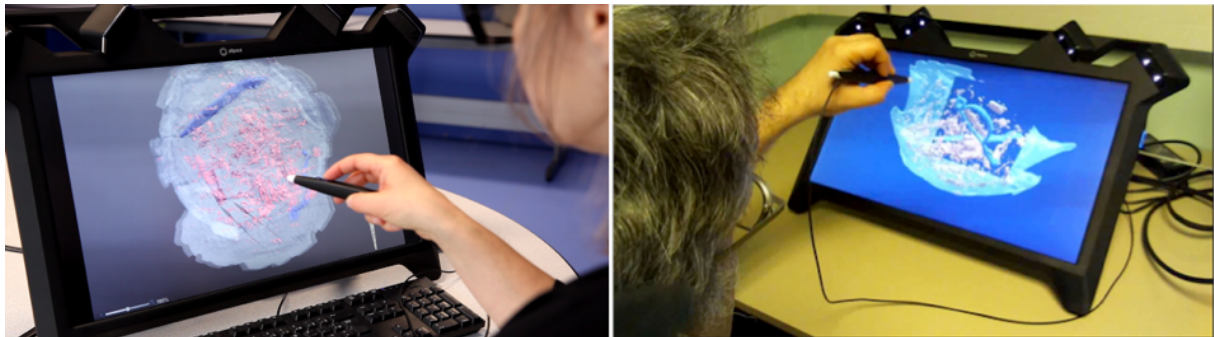


Fig. 7. Environnement de fouille virtuelle. © IRISA.

Un tel environnement peut servir en amont de la fouille comme support d'aide à la décision. Dans ce cas, comme pour le système de réalité augmentée, il aide à définir un protocole de fouille visant à préserver au mieux les éléments internes du mobilier archéologique. Il sert aussi pendant la fouille, comme support de documentation. L'application s'interface avec une base de données qui sauvegarde les notes ajoutées dans l'environnement 3D durant la session de travail. Enfin, grâce aux outils de visualisation, de manipulation et de prise de mesures, l'environnement virtuel peut être un support d'étude après la fouille.

Discussion

La tomodensitométrie est un outil particulièrement efficace en archéologie préventive : non destructive, elle permet l'analyse d'artefacts non visibles et de séries d'objets ou la manipulation d'objets inaccessibles. Support précieux pour la fouille des crémations, par exemple, elle fournit

presque immédiatement des résultats pour l'étude ou pour la restauration (état des matériaux). Après la fouille, l'imagerie 3D, la segmentation et l'impression 3D peuvent toutes être réalisées en quelques heures, délivrer une grande quantité d'informations et offrir un accès rapide à l'objet – en particulier quand il s'agit d'un objet complexe, combinant plusieurs artefacts et différents matériaux. Inversement, une fouille « traditionnelle » a pour conséquence d'allonger le temps nécessaire à la conservation et à l'étude.

Les différents environnements présentés ici ont été appliqués à d'autres contextes archéologiques, qu'il s'agisse d'objets (Gagne *et al.* 2018a, 2018b), ou de sites complets (Nicolas *et al.* 2018 ; Paradis *et al.* 2019).

L'impression 3D d'un objet peut également être utilisée dans une simulation contextuelle en réalité virtuelle. Dans ce cas, l'objet imprimé en 3D devient une interface tangible pour faire revivre une activité humaine. L'association de la représentation physique d'un objet et d'un contexte d'utilisation permet de mieux comprendre les activités passées. Manipuler un artefact ou sa copie, essayer d'imaginer à quel usage il était destiné, ne suffisent généralement pas à appréhender la réalité physique du geste associé. En accompagnant ses gestes d'accessoires tangibles dans un contexte simulé en réalité virtuelle, l'archéologue qui « rejoue » l'activité en question en acquiert une compréhension plus précise – ce qui est particulièrement important pour la capture de mouvement (Nicolas *et al.* 2015 ; Gagne *et al.* 2018b ; Barreau *et al.* à paraître).

Conclusion

Nous avons illustré ici des cas d'usage variés autour des données issues de l'analyse par tomodensitométrie d'une urne funéraire. La combinaison d'imagerie médicale et d'environnements interactifs en 3D, basée sur nos différents travaux de recherche, permet aux archéologues d'analyser les artefacts présents dans l'urne indépendamment de la fouille physique de celle-ci.

L'impression 3D de la fibule a donné un accès quasi immédiat à une représentation physique de l'objet. L'impression complexe transparente de l'urne constitue une représentation spatiale de sa structure interne, manipulable sans média technologique. Le système de réalité augmentée permet de visualiser les données 3D en superposition de l'objet original, afin de préparer la fouille. Le système de réalité virtuelle offre un ensemble d'outils interactifs d'aide à l'analyse et la documentation.

Ces différents exemples illustrent l'utilité des outils d'interaction 3D en amont (phase de préparation) ainsi que tout au long des opérations de fouille et de restauration. La numérisation du mobilier associée aux technologies XR permet une intervention différée et permanente sur les artefacts

Par ailleurs, les données 3D peuvent être intégrées dans un univers virtuel plus riche pour remettre en contexte l'artefact, qu'il s'agisse d'un contexte de fabrication, d'utilisation ou de découverte. Il est alors possible de proposer des interactions avec une simulation de la fonction de l'artefact. En renouvelant leurs problématiques de recherche et en modifiant leurs pratiques, ces méthodes et ces outils ouvrent donc de nouvelles perspectives aux archéologues. Ces technologies offrent en effet un mode de perception (proprioception) et des interactions multiples, comme la navigation naturelle à l'échelle 1, inaccessibles à travers un simple écran équipé d'un clavier et d'une souris.

Les interactions avec les objets volumiques ou surfaciques multi-échelles donneront accès à des données d'une grande richesse. L'interaction avec les objets tangibles, obtenus par exemple par impression 3D, ainsi que l'association sur le même plan de données 3D et de matériel archéologique, en réalité mixte, ouvrent un champ d'investigation important, notamment pour l'interprétation en contexte qui permet à l'archéologue de reproduire des dynamiques d'interactions à plusieurs niveaux : entre les éléments d'un site, entre lui-même et ces éléments, et entre les humains de l'époque et ces éléments. Pour cela, un des défis à relever concerne la simulation de l'activité humaine, dans les environnements contextualisés.

Bibliographie

- ARNALDI B., FUCHS P. & TISSEAU J. 2003. « La réalité virtuelle et ses applications ». In : P. Fuchs (dir.), *Traité de la réalité virtuelle*, vol. 1. Paris : Les Presses de l'École des Mines : 3-51.
- AUBRY L. & LE PUIL-TEXIER M. 2014. *Un enclos funéraire de l'âge du Fer, Domaine de La Bizaie, Guipry, (Ille-et-Vilaine) : rapport de fouilles*, Cesson-Sévigné, Inrap Grand Ouest : 113-119.
- AZUMA R. T. 1997. « A survey of augmented reality », *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 6, n° 4 : 355-385. <https://www.cs.unc.edu/~azuma/ARpresence.pdf>
- BARREAU J.-B., NICOLAS T., BRUNIAUX G., PETIT E., PETIT Q., BERNARD Y., GAUGNE R. & GOURANTON V. 2014. « Photogrammetry Based Study of Ceramics Fragments », *International Journal of Heritage in the Digital Era*, vol. 3, n° 4 : 643-656. [10.1260/2047-4970.3.4.643](https://doi.org/10.1260/2047-4970.3.4.643) ; [hal-01394971](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01394971).
- BARREAU J. B., NOUVIALE F., GAUGNE R., BERNARD Y., LLINARES S. & GOURANTON V. 2015. « An Immersive Virtual Sailing on the 18th -Century Ship Le Boullongne », *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 24, n° 3 : 201-219. [10.1162/PRES_a_00231](https://doi.org/10.1162/PRES_a_00231) ; [hal-01218209](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01218209).
- BARREAU J. B., GAUGNE R. & GOURANTON V. 2017. « Immersive point cloud manipulation for cultural heritage documentation ». In : G. Bruseker, L. Kovács & F. Niccolucci (dir.), *ERCIM News*, n° spécial « Digital Humanities », vol. 111 : 33-34. <https://ercim-news.ercim.eu/en111/special/immersive-point-cloud-manipulation-for-cultural-heritage-documentation>.
- BARREAU J. B., GAUGNE R., OLIVIER A.-H., LLINARES S. & GOURANTON V. 2020 « Reconstitution de la vie à bord d'un navire de la Compagnie des Indes Orientales au 18^e siècle », *In Situ, Revue des patrimoines*, n° 42, DOI : <https://doi.org/10.4000/insitu.27496>.
- Gaugne R., Porcier S., Nicolas T., Coulon F., Hays O. & Gouranton V. 2018a. « A digital introspection of a mummy cat ». In : *New Realities: Authenticity & Automation in the Digital Age. Proceedings of the 3rd International Congress & Expo, IEEE, Oct. 2018, San Francisco, United States*. [hal-01875690](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01875690).
- GAUGNE R., SAMAROUDI M., NICOLAS T., BARREAU J.-B., GARNIER L., RODRIGUEZ ECHAVARRIA K. & GOURANTON V. 2018b. « Virtual Reality (VR) interactions with multiple interpretations of archaeological artefacts ». In : *EG GCH 2018 - 16th EUROGRAPHICS Workshop on Graphics and Cultural Heritage, Nov 2018, Vienna, Austria*.
- GAUGNE R., PETIT Q., BARREAU J.-B. & GOURANTON V. 2019a. « Interactive and Immersive Tools for Point Clouds in Archaeology ». In : *ICAT-EGVE 2019 - International Conference on Artificial Reality and Telexistence - Eurographics Symposium on Virtual Environments, Sep 2019, Tokyo, Japan*. [hal-02272912](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02272912).
- GAUGNE R., NICOLAS T., PETIT Q., OTSUKI M. & GOURANTON V. 2019b. « Evaluation of a mixed reality based method for archaeological excavation support ». In : *ICAT-EGVE 2019 - International Conference on Artificial Reality and Telexistence - Eurographics Symposium on Virtual Environments, Sep 2019, Tokyo, Japan*.
- Gaugne R. & Gouranton V. 2019. « Le projet Introspect : archéologie et eXtended Reality (XR) ». In : *Les Rencontres du Consortium 3D SHS, Dec 2019, Nantes, France*. [hal-02491726](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02491726)
- KINSMAN T. 2016. « Shoot Super Detailed Macro Photographs with an RTI Camera Rig », *Maker Media*. En ligne : <https://makezine.com/projects/shoot-super-detailed-macro-photographs-with-an-rti-camera-rig/>
- LECUYER F., GOURANTON V., GAUGNE R., NICOLAS T., MARCHAND G. & ARNALDI B. 2018. « INSIDE. Interactive and Non-destructive Solution for Introspection in Digital Environments ». In : *2018 3rd Digital Heritage International Congress (Digital Heritage) held jointly with 2018 24th International Conference on Virtual Systems & Multimedia (VSMM 2018)*. [hal-01875793](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01875793).

MILGRAM P. & KISHINO F. 1994. « A Taxonomy of mixed reality visual displays ». *IEICE Transactions on Information and Systems*, vol. E77-Dn ° 12 : 1 321-1 329. [10.1.1.102.4646](https://doi.org/10.1.1.102.4646).

NICOLAS T., GAUGNE R., TAVERNIER C., GOURANTON V. & ARNALDI B. 2014. « Preservative approach to study encased archaeological artefacts ». In: M. Ioannides, N. Magnenat-Thalmann, E. Fink, R. Žarnić, A.-Y. Yen & E. Quak (dir.), *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection. 5th International Conference, EuroMed 2014, Limassol, Cyprus, November 3-8, 2014* : 332-341 (coll. « Lecture Notes in Computer Science », 8740). [10.1007/978-3-319-13695-0_32](https://doi.org/10.1007/978-3-319-13695-0_32) ; [hal-01090157](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01090157).

NICOLAS T., GAUGNE R., TAVERNIER C., PETIT Q., GOURANTON V. & ARNALDI B. 2015. « Touching and Interacting with Inaccessible Cultural Heritage », *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 24, n° 3 : 265-277. [hal-01218223](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01218223).

NICOLAS T., GAUGNE R., TAVERNIER C., GOURANTON V. & ARNALDI B. 2016a. Internal 3D Printing of Intricate Structures. *6th International Conference on Cultural Heritage - EuroMed 2016*, Oct 2016, Nicosia, Cyprus. pp.432-441. [hal-01391762](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01391762)

NICOLAS T., GAUGNE R., TAVERNIER C., GOURANTON V. & ARNALDI B. 2016b. « La tomographie, l'impression 3D et la réalité virtuelle au service de l'archéologie », *Les nouvelles de l'archéologie*, n° 146 : 16-22. <http://journals.openedition.org/nda/3823> ; [10.4000/nda.3823](https://doi.org/10.4000/nda.3823).

NICOLAS T., GAUGNE R., TAVERNIER C., MILLET E., BERNADET R. & GOURANTON V. 2018. « Lift the veil of the block samples from the Warcq chariot burial with 3D digital technologies ». In : *New Realities: Authenticity & Automation in the Digital Age. Proceedings of the 3rd International Congress & Expo, IEEE, Oct. 2018, San Francisco, United States*. [hal-01875702](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01875702).

PARADIS M. A., NICOLAS T., GAUGNE R., BARREAU J.-B., AUGER R. & GOURANTON V. 2019. « Making virtual archeology great again (without scientific compromise) », *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, n° spécial 27th CIPA International Symposium "Documenting the Past for a Better Future", Sep 2019, Ávila, Spain, vol. XLII-2/W15 : 879-886.