Techniques de production, d'exploration et d'analyse d'environnements archéologiques virtuels

Jean-Baptiste Barreau

▶ **To cite this version:**

Jean-Baptiste Barreau. Techniques de production, d'exploration et d'analyse d'environnements archéologiques virtuels. Synthèse d'image et réalité virtuelle [cs.GR]. INSA de Rennes, 2017. Français. NNT : 2017ISAR0014 . tel-01633811

HAL Id: tel-01633811
https://theses.hal.science/tel-01633811

Submitted on 13 Nov 2017

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.

Thèse

UNIVERSITE
BRETAGNE
LOIRE

THESE INSA Rennes
sous le sceau de l'Université Bretagne Loire
pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE L'INSA RENNES
Spécialité : Informatique

présentée par

Jean-Baptiste Barreau

ECOLE DOCTORALE : *MATISSE*
LABORATOIRE : *IRISA – UMR6074*

Techniques de production, d'exploration et d'analyse d'environnements archéologiques virtuels

Thèse soutenue le 10.07.2017
devant le jury composé de :

Jean-Louis Pazat
Professeur à l'INSA de Rennes / Président
Nadine Couture
Professeur à l'ESTIA / Rapporteure
Pascal Guitton
Professeur à l'Université Bordeaux I / Rapporteur
Guillaume Moreau
Professeur à l'Ecole Centrale de Nantes / Examinateur
Francois Giligny
Professeur à l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne / Examinateur
Réginald Auger
Professeur à l'Université Laval / Examinateur
Bruno Arnaldi
Professeur à l'INSA de Rennes / Directeur de thèse
Valérie Gouranton
Maître de conférences à l'INSA de Rennes / Encadrante de thèse

Techniques de production, d'exploration et d'analyse d'environnements archéologiques virtuels

Jean-Baptiste BARREAU

En partenariat avec

Document protégé par les droits d'auteur

Tout a une fin, sauf la banane qui en a deux.
Proverbe bambara

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier mon directeur de thèse, M. Bruno Arnaldi, professeur à l'INSA de Rennes et directeur adjoint de l'Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires, pour m'avoir accueilli au sein de l'équipe Hybrid. Je lui suis reconnaissant pour le temps qu'il m'a accordé, son soutien, ses enseignements et sa sympathie. J'adresse de chaleureux remerciements à mon encadrante de thèse, Mme Valérie Gouranton, maître de conférences à l'INSA de Rennes, pour sa considération de tout instant sur mes travaux, ses conseils avisés, sa lecture et son écoute qui ont alimenté le bon déroulement de cette thèse.

Un immense merci à Ronan Gaugne, ingénieur de recherche responsable technique de la plateforme Immersia, Quentin Petit et Florian Nouviale, ingénieurs de recherche associés, initiateurs et moteurs des implémentations d'environnements archéologiques virtuels. Je souhaite aussi remercier infiniement M. Yann Bernard, infographiste 3D et co-bâtisseur du CNPAO, pour son immense investissement et ses compétences qu'il a mis au service des différents projets et acteurs liés à cette thèse. Je suis également reconnaissant envers Sandrine Bergerot, Maxime Billardey, Simon Bourdin, Adrien Brooks, Alexandra Brun, Guillaume Bruniaux, Yann Cariou, Paul Désiles, Violaine Dubreuil, Clara Figuet, Kevin Gino, Maxime Le Boedec, Jade Ledolledec, Darwin Medina Fonseca, Mathilde Paradis, Aurélien Partiot, Émilien Petit, Loïc Rios et Marta Anna Sadowska, qui ont effectué un stage au sein du CNPAO. Je tiens aussi à honorer les collaborations effectuées avec Florian Cousseau dans le cadre de sa thèse sur "l'archéologie du bâti mégalithique dans l'ouest de la France" (Cousseau, 2016).

Je voudrais remercier les rapporteurs de cette thèse Mme Nadine Rouillon Couture, professeure à l'École Supérieure des Technologies Industrielles Avancées (ESTIA) et M. Pascal Guitton, professeur à l'université Bordeaux 1, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail. J'associe à ces remerciements M. Guillaume Moreau, professeur à l'École centrale de Nantes, M. Francois Giligny, professeur à l'université Paris 1 Panthéon-Sorbonne et M. Réginald Auger, professeur à l'Université Laval, pour avoir accepté d'examiner mon travail.

Il m'est difficile de remercier tous les membres du laboratoire CReAAH qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce manuscrit. Je tiens cependant à souligner l'accompagnement, la bienveillance et la disponibilité des directeurs et directeur adjoint de l'UMR6566 Pierre-Yves Laffont, maître de conférences à l'Université Rennes 2, Marie-Yvane Daire, directrice de recherche au CNRS et Grégor Marchand, directeur de recherche au CNRS. Je tiens également mettre en évidence le soutien d'Annie Delahaie,

Catherine Louazel, Catherine Gorlini, Laurent Quesnel et Francis Bertin, respectivement secrétaire, gestionnaire, documentaliste et infographistes de l'unité. Par là, il me faut insister sur la reconnaissance que je porte à l'accord du CNRS et aux facilités allouées pour la réalisation de cette thèse, et ce dans le cadre de ses plans de formation. Je désire ensuite remercier M. Anatole Lécuyer, directeur de recherche INRIA et responsable de l'équipe Hybrid, ainsi que tous les membres de l'équipe, pour leur accueil, l'aide scientifique, l'attention et l'ambiance dynamique qui m'ont servi de véritable tuteur.

Bien sûr, atteindre ces objectifs n'aurait pas été possible sans l'aide des assistants de vie qui m'ont accompagné au quotidien durant ces 3,5 années. Je souhaite ainsi saluer Anifa Abdallah, Audrey Adechokan Hibath, Marjan Azamilorestani, Etienne Campagnol, Quentin Delaplace, Babette Djikeussi Djeutcheu, Camille Farrugia, Tassinimi Idaroussi, Serge Kagone Pagnangde, Yohan Le Hesran, Erika Mbaffeu Dibate, Mouhamed Mouliom Njankouo, Marie-José Ngo Um Tegue, Julie Ngonzeg Ebongue, Jasma Salim Ahmed, Matteo Salvatore et Cyrille Sipeuhou Tchumo. Je remercie aussi mes amis et ma famille pour leur soutien indéfectible qui constitue le ciment de mon existence.

Table des matières

Introduction 1

1 État de l'art : 3D et archéologie 4
1.1 Relations scientifiques . . . 5
1.1.1 Quelques origines . . . 5
1.1.2 Besoins identifiés de la communauté archéologique . . . 7
1.1.3 Organisations . . . 8
1.2 Numérisation 3D de l'existant . . . 8
1.2.1 Contexte . . . 8
1.2.2 Origines théoriques . . . 9
1.2.2.1 Quelques travaux fondateurs pour la photogrammétrie . 9
1.2.2.2 Quelques travaux fondateurs pour la lasergrammétrie . 10
1.2.2.3 Complémentarité des approches . . . 10
1.2.3 Photogrammétrie appliquée à l'archéologie . . . 12
1.2.3.1 Brève histoire contemporaine et définitions . . . 12
1.2.3.2 Mesure photogrammétrique . . . 13
1.2.3.3 Exploitations photogrammétriques . . . 13
1.2.3.4 Utilisations en archéologie . . . 15
1.2.4 Lasergrammétrie appliquée à l'archéologie . . . 16
1.2.4.1 Brève histoire contemporaine et définitions . . . 18
1.2.4.2 Principes physiques et théoriques . . . 18
1.2.4.3 Utilisations en archéologie . . . 20
1.2.5 Traitement des données 3D numérisées . . . 20
1.2.5.1 Consolidation . . . 22
1.2.5.2 Segmentation . . . 22
1.2.5.3 Polygonisation . . . 22
1.2.5.4 Anastylose . . . 24
1.2.6 Analyses comparatives . . . 24
1.2.7 Imagerie médicale . . . 28
1.3 Modélisation 3D de l'hypothétique . . . 31
1.3.1 Origines théoriques et architecturales . . . 31
1.3.1.1 Typologie . . . 31
1.3.1.2 Définitions . . . 32

1.3.1.3 Modes de représentation 32
1.3.2 Modélisation architecturale 33
1.3.2.1 Notions 33
1.3.2.2 Types 34
1.3.2.3 Production scientifique 35
1.3.2.4 Médiation scientifique 36
1.3.2.5 Logiciels 37
1.4 Constatations générales 37

2 État de l'art : Simulation visuelle hors ligne et réalité virtuelle en archéologie 40
2.1 Simulation visuelle précalculée 41
2.1.1 Simulation mécanique 41
2.1.1.1 Schématiques 41
2.1.1.2 Photoréalistes 42
2.1.1.3 Objets 43
2.1.1.4 Ossatures et ornements 44
2.1.1.5 Industrie 47
2.1.2 Simulation d'éclairages 47
2.1.2.1 Lecture de l'environnement intérieur 48
2.1.2.2 Prédiction de techniques d'éclairage 48
2.1.2.3 Lecture de l'environnement extérieur 49
2.1.3 Simulations géologiques et hydrologiques 49
2.1.3.1 Stratigraphie 51
2.1.3.2 Processus hydrologiques 51
2.1.4 Simulations végétales 53
2.1.5 Simulation d'humains virtuels 56
2.1.5.1 Mises en scène 56
2.1.5.2 Foules 56
2.2 Réalité virtuelle 58
2.2.1 Éditeurs et premières interactions 60
2.2.1.1 Déconnectés 60
2.2.1.2 Connectés 62
2.2.2 Dispositifs de navigation immersive 62
2.2.2.1 Immersions panoramiques 62
2.2.2.2 Couches de données 64
2.2.2.3 Multi-observateurs 65
2.2.3 Interaction avec les objets 65
2.2.3.1 Segmentation 67
2.2.3.2 Sans altération 67
2.2.3.3 Interfaces haptiques 67
2.2.3.4 Motion capture 69
2.2.4 Contexte matériel et logiciel mis à disposition 70
2.2.4.1 Architecture matérielle 70
2.2.4.2 Architectures logicielles 71

2.2.4.3 Comparaison des implémentations 73
2.3 Observations et premières explications 74

3 Mise en place d'un processus transdisciplinaire 75
3.1 Définitions 76
3.2 Contexte 76
3.2.1 Limitations 76
3.2.2 Structure de production de données archéologiques 3D 77
3.3 Présentation du corpus 78
3.4 Analyse du corpus 80
3.4.1 Numérisation 81
3.4.2 Modélisation 81
3.4.3 Rendus 81
3.4.4 Métriques organisationnelles 83
3.5 Considérations empiriques 85

4 Production d'environnements archéologiques 3D pour la recherche archéologique 88
4.1 Numérisation de l'existant 88
4.1.1 Photogrammétrie 89
4.1.1.1 Petits sites 89
4.1.1.2 Objets 92
4.1.2 Lasergrammétrie 94
4.1.3 µ-tomodensitométrie 95
4.1.3.1 Reconstitution sonore 95
4.1.3.2 Tracéologie 95
4.2 Modélisation de l'hypothétique 97
4.2.1 Apports de l'existant 97
4.2.2 Traitement de la documentation archéologique 100
4.3 Évolution temporelle 106
4.3.1 Comparaison entre l'hypothétique et l'existant 107
4.3.2 Construction d'un environnement archéologique 109
4.3.3 Changements d'état 110
4.4 Déductions scientifiques 110
4.4.1 Preuve de technique de construction 111
4.4.2 Études quantitatives 112
4.5 De la sérendipité à l'heuristique 113

5 Méthodes d'interactions et de simulations immersives pour l'archéologie 115
5.1 Interactions à l'échelle 1:1 115
5.1.1 Navigations dans l'environnement archéologique virtuel 116
5.1.1.1 Marche et navigation libre 116
5.1.1.2 Téléportation 118
5.1.1.3 Points d'intérêt 118
5.1.1.4 Environnements archéologiques mobiles 119

5.1.2 Interaction avec les objets de l'environnement archéologique virtuel 120
5.1.2.1 Sans modification de l'environnement 120
5.1.2.2 Avec modification de l'environnement 122
5.1.3 Apports pour l'archéologie 127
5.1.3.1 Apports d'informations archéologiques 127
5.1.3.2 Apports pour la pratique archéologique 127
5.2 Simulation de certains aspects de l'environnement archéologique 129
5.2.1 Milieux et principes physiques 129
5.2.1.1 Considérations lithosphériques et hydrosphériques . . . 129
5.2.1.2 Simulations physiques 130
5.2.2 Êtres vivants 132
5.2.2.1 Flore 132
5.2.2.2 Faune 133
5.2.2.3 Humains 134
5.2.3 Outil pluridisciplinaire 137
5.3 Valorisation du savoir scientifique 137
5.3.1 Conférence grand public 138
5.3.2 Expériences immersives 138
5.3.3 Exposition 140
5.3.4 Médiation audiovisuelle 140

Conclusion 143

Table des figures 175

Introduction

L'archéologie est une activité de terrain qui consiste notamment en l'acquisition de documentation à travers des travaux de fouille. Au sens propre, le corps tout entier de l'archéologue va creuser le sol, toucher et sentir des vestiges qui vont lui apporter de l'information sur les sociétés humaines du passé. Tout comme nombre de scientifiques ou plus proche de lui l'ethnologue, qui va jusqu'à partager la vie quotidienne de sociétés humaines du présent, il opère la confrontation d'une grande partie de son corps (cf. figure 1) à des sources de données pouvant stimuler plus de sens que sa vue et son ouïe. Par le fait, celles-ci sont généralement considérées comme nécessaires et suffisantes pour nombre de métiers, comme la pratique scientifique qui n'échappe pas à la règle. Plus généralement, l'archéologie se voit cernée d'un certain nombre de dissonances, communément admises, et avec lesquelles elle doit se débattre : bureau ou terrain, manuel ou intellectuel, qualitatif ou quantitatif, littéraire ou scientifique, nature ou culture, etc. Son exercice permet cependant de prouver l'existence de grandes porosités au sein de ces incompatibilités hiératiques.

FIGURE 1 – Représentations de l'implication du corps du scientifique au sein des films *La Mouche* (David Cronenberg) et *Indiana Jones et le Temple maudit* (Steven Spielberg)

De son côté, l'informatique porte aussi un certain nombre d'étiquettes qui impliquent la génération de malentendus. Parmi ceux entrainant la création fortuite de frontières infructueuses avec d'autres disciplines scientifiques, nous pouvons d'abord évoquer l'idée que le numérique délivrerait l'homme de certaines tâches, mais ne lui permettrait pas de se révéler de nouvelles compétences. Dans une logique de dualisme platonicien, il supposerait aussi un déni du corps de l'utilisateur au profit d'une focalisation sur sa pensée, et ce au sein d'une cohabitation homme-machine contraignante et codifiée. Ensuite, son image utilitariste véhicule l'illusion d'une offre systématique de solutions normalisées à des problématiques plurielles et complexes, comme celles inhérentes aux sciences

douces. Concernant la disparité des volumes de données entre les sciences humaines, son importance semble enfin parfois noyée par le phénomène *Big Data* qui, comme tout phénomène, peut créer des amalgames. La taille et la qualité des traces numériques laissées actuellement par l'humanité étant en effet considérable, il est facile de tomber dans l'écueil de croire qu'il en est de même pour le volume de données, souvent désordonnées et incomplètes, déduites des sources écrites et vestiges matériels du passé.

À partir de ces quelques constats hétérogènes, il semble difficile de voir comment et pourquoi modifier l'actuelle relation entre archéologie et informatique. En exagérant et sous la métaphore automobile, on peut se laisser dire que l'archéologie, chargée de méthodes pluridisciplinaires, profite à l'heure actuelle de l'aspiration de la voiture de course informatique pour accélérer son rythme de croisière. Cette acquisition de gain de vitesse peut sembler à première vue légitime, mais il apparaîtrait aussi judicieux d'améliorer la souplesse de conduite du véhicule archéologique, notamment pour qu'il puisse mieux explorer les recoins de ses sujets d'étude.

C'est ainsi vers cette proposition que nous avons orienté cette thèse, en tentant également de contourner l'épineux problème d'incommunicabilité entre les disciplines lié aux complexités réciproques des modélisations purement mathématiques et longs textes archéologiques. Pour cela, nous avons d'abord considéré l'image de synthèse pouvant représenter le présent et le passé hypothétique, ainsi que les interactions associées à sa construction, comme moyen transdisciplinaire de dialogue et de création d'information scientifique. Mais d'un point de vue des sciences cognitives et malgré ses nombreux atouts en matière de transmission d'informations, l'image seule, animée ou non, ne peut véritablement prétendre imprimer de la connaissance dans le cerveau de l'archéologue, soumis régulièrement à de nombreuses représentations graphiques qu'il doit analyser et critiquer. Pour qu'il puisse traiter l'information véhiculée par l'image, inventer et adapter son raisonnement, l'idée suivante a donc été de soumettre son corps tout entier, comme il le fait quand cela est possible sur le terrain à l'instant présent, à des dispositifs de réalité virtuelle l'immergeant dans des environnements du passé et initiant des possibilités de contrôle de ceux-ci.

Composé de cinq chapitres, ce manuscrit de thèse est organisé de la façon suivante. Les deux premiers chapitres sont consacrés à l'état de l'art de la littérature reliant 3D, simulation visuelle, réalité virtuelle et archéologie. Le chapitre 1 abordera les travaux de numérisation et de restitution 3D, considérées ici comme deux approches distinctes. Le chapitre 2 traitera de l'exploitation de productions 3D en contexte archéologique au sein de simulations visuelles hors lignes et de dispositifs de réalité virtuelle. Après avoir théorisé dans le chapitre 3 la constitution et le fonctionnement d'une structure publique dédiée à la production de données archéologiques 3D, nous détaillerons dans le chapitre 4 les méthodes de production et leurs enjeux en matière de recherche. Dans un contexte de réalité virtuelle, le chapitre 5 traitera ensuite des différentes méthodes d'interactions et de simulations immersives développées durant cette thèse et à destination

de la communauté archéologique. Dans le chapitre "Conclusion", nous clorons sur nos quelques travaux sur les thématiques de production, d'exploration et d'analyse d'environnements archéologiques virtuels et présenterons les différentes perspectives possibles de ces travaux.

Chapitre 1

État de l'art : 3D et archéologie

Souvent considérée comme cerise sur le gâteau archéologique, l'utilisation de la 3D s'intègre pourtant intrinsèquement dans cette discipline dont les objets d'étude sont les vestiges matériels laissés par l'Homme depuis la préhistoire. Dans ce chapitre, nous allons essayer d'ébaucher un état de l'art de cette intégration. Après avoir abordé des relations scientifiques entre imagerie et archéologie (section 1.1), nous dégagerons un premier bloc que constitue la numérisation 3D de l'existant (section 1.2), puis un second concernant modélisation 3D de l'hypothétique (section 1.3) (cf. figure 1.1).

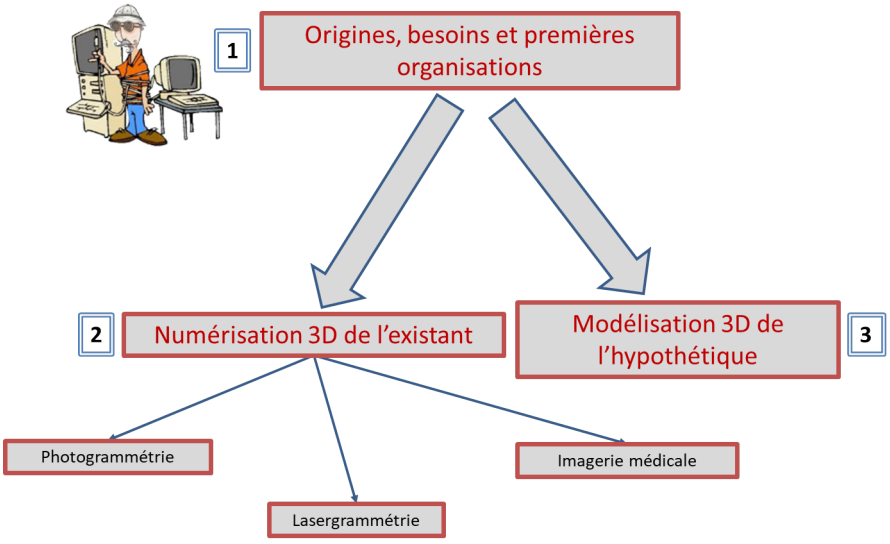


FIGURE 1.1 – Organisation schématique des thématiques développées dans le chapitre 1 "État de l'art : 3D et archéologie"

1.1 Relations scientifiques

À l'instar de nombreuses sciences, les relations entre imagerie numérique et archéologie ont débuté aux premières percées de l'infographie. Les enjeux archéologiques n'étant pas les mêmes que pour l'imagerie médicale ou le divertissement, les moyens et ainsi l'évolution de ces relations ont été différents. Nous allons tenter dans cette partie d'illustrer cette évolution au travers de quelques exemples concernant ses origines, les besoins de la communauté archéologique et les organisations créées. Nous n'évoquerons cependant pas le point de vue général liant informatique et archéologie, traité en France notamment par F. Giligny (Giligny, 2011) et F. Djindjian (Djindjian, 2009). Après avoir relayé quelques origines marquantes d'usages de la 3D en archéologie (sous-section 1.1.1), nous observerons les besoins exprimés par les archéologues (sous-section 1.1.2) et l'émergence d'organisations dédiées à ces problématiques (sous-section 1.1.3).

1.1.1 Quelques origines

Sans prétendre faire la genèse exhaustive de l'utilisation de l'imagerie en archéologie, qui peut constituer un sujet d'étude à part entière (Fèvres-de Bideran, 2013), nous souhaitons en premier lieu souligner un premier travail d'imagerie aérienne paru en 1977 dans la revue scientifique *Journal of Archaeological Science* (Palmer, 1977). Un ordinateur (Cambridge IBM 370/165) génère alors un plan à une échelle donnée (cf. figure 1.2) à partir de photographies aériennes obliques, de points de contrôle et de premières équations liées à la photogrammétrie (Hallert, 1960). En 1981, M. Daily évoque ensuite une utilisation de l'imagerie radar appliquée à la géologie et ainsi à la détection de structures archéologiques (Daily, 1981).

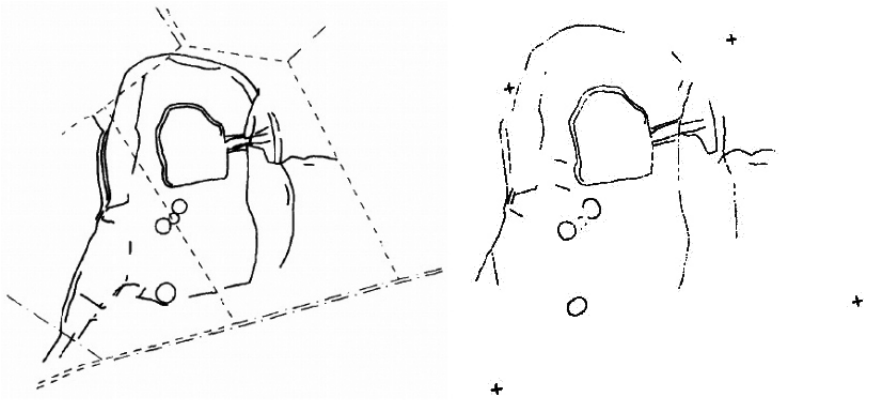


FIGURE 1.2 – Plan dessiné à la main (à gauche) comparé à un plan tracé par ordinateur à partir de photos aériennes de site archéologique (à droite) (Palmer, 1977)

Au milieu des années 1980, les premières représentations 3D apparaissent d'abord dans une publication traitant de l'archéologie sous-marine (Carter et Covill, 1986), avec notamment une image représentant une vue 3D de morceaux d'épave (cf. figure 1.3). Peu après, une reconstruction de la cathédrale saxonne de Winchester, démolie à la fin

du XI[e] siècle, est effectuée en 1987 par IBM et son système WINSOM (Flicketts *et al.*, 1989). De 1987 à 1989 en France, une équipe de recherche dirigée par Jean-Claude Goyon et Jean-Claude Golvin guide la modélisation du temple de Karnak en Haute-Égypte (Boccon-Gibod et Golvin, 1990) calculée par les moyens matériels et logiciels de l'EDF (Fuchs *et al.*, 2006) (cf. figure 1.4). Vers le début des années 1990, Christian Père travaille sur un premier modèle numérique de l'abbaye de Cluny (Père, 2006). Cette reconstitution sera utilisée plus tard dans un film intitulé *Mémoires de pierres* (cf. figure 1.4). Au même moment, IBM travaille sur la reconstruction 3D de l'église Notre-Dame de Dresde (cf. figure 1.5) avec les logiciels 3D Explore (TDImage) et CATIA (Dassault Aviation) (Collins *et al.*, 1995). Aussi évoquée comme la tombe du Christ, la tombe de Zacharie (Jérusalem) est numérisée en 1992 et une proposition de restitution est effectuée (Cooper, 1993). La démarche d'associer des techniques de numérisation et de restitution pour ce projet est particulièrement intéressante (cf. figure 1.6).

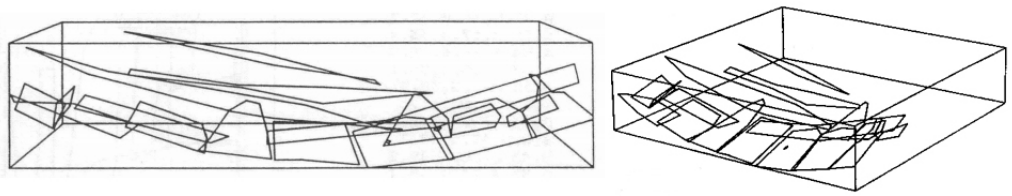


FIGURE 1.3 – Vues 3D de morceaux d'épave (Carter et Covill, 1986)

FIGURE 1.4 – 1 : Temple d'Amon-Rê à Karnak (Boccon-Gibod et Golvin, 1990) / 2 : Cathédrale saxonne de Winchester (Flicketts *et al.*, 1989) / 3 : Abbaye de Cluny (film *Mémoires de pierres*) (Père, 2006)

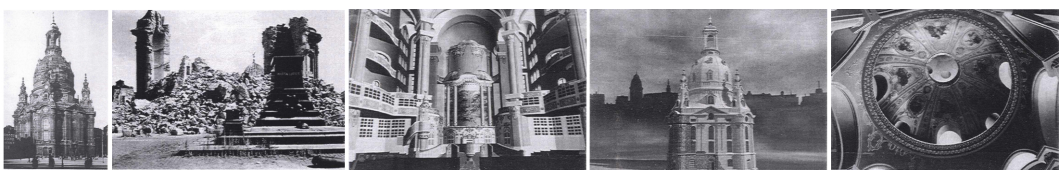


FIGURE 1.5 – Église Notre-Dame de Dresde avant et après destruction et reconstruction 3D (Collins *et al.*, 1995)

Dans les années 2000, l'importance archéologique des monuments disséminés à travers l'Europe est enfin mise en relation avec les premiers véritables essors des technologies de numérisation 3D. Parce qu'ils sont présents partout en Europe, le cas des

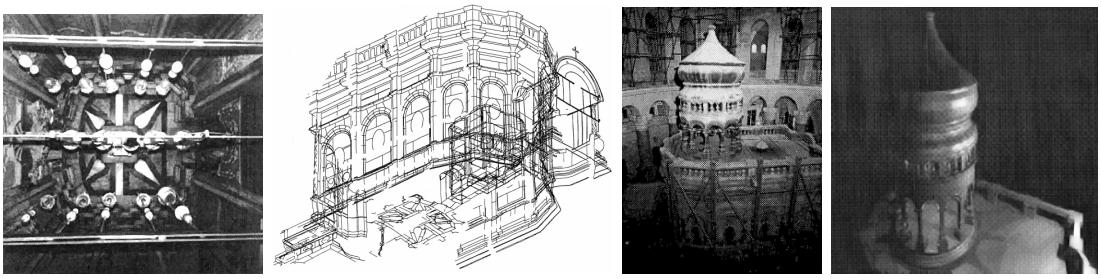


FIGURE 1.6 – Cliché vertical de la chapelle de la tombe de Zacharie (Jérusalem) / écorché filaire de l'édicule / édicule actuel / rendu au lancer de rayon d'une modélisation de l'édicule (Cooper, 1993)

châteaux est particulièrement parlant lorsque l'on considère les numérisations et modélisations (cf. figure 1.7) effectuées au nord-ouest de l'Allemagne (Kersten *et al.*, 2004) et en Italie du Nord (El-Hakim *et al.*, 2007).

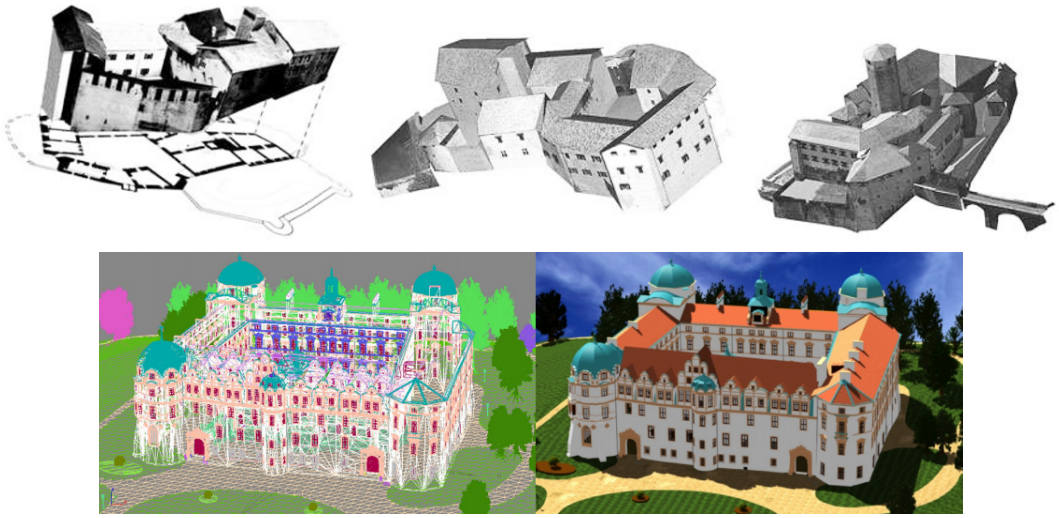


FIGURE 1.7 – Numérisations et modélisations de châteaux en Italie du Nord (El-Hakim *et al.*, 2007) et au nord-ouest de l'Allemagne (Kersten *et al.*, 2004)

1.1.2 Besoins identifiés de la communauté archéologique

Au-delà d'un intérêt évident en ce qui concerne la valorisation du patrimoine culturel (Kondo *et al.*, 2010), notamment auprès des utilisateurs d'internet (Fanini et Ferdani, 2012), les restitutions 3D de structures ou d'environnements permettent de mieux comprendre leurs fonctionnements et donc les sociétés qui les ont occupées. D. Pletinckx parle en effet de véritables outils pour les chercheurs (Pletinckx, 2009). On évoque alors un champ multidisciplinaire mêlant archéologie, conception graphique, informatique et réalité virtuelle utilisable par les archéologues comme support pour le raisonnement,

la visualisation, la perception, ou l'éducation (Le Cloirec, 2009, Hermon, 2008). Des réflexions naissent également autour de défis de recherche comprenant la gestion des droits numériques des modèles 3D, des métadonnées associées, la représentation de l'incertitude, l'indexation, les outils de recherche et la conservation à long terme (Koller *et al.*, 2010).

1.1.3 Organisations

Vers le début des années 2010, le projet de recherche européen 3D-COFORM (Arnold, 2009) (Pitzalis, 2011) promeut des outils et méthodes pour l'utilisation de modèles 3D en archéologie et dans le domaine du patrimoine culturel. Il propose un éventail de processus de numérisation 3D en association avec un Virtual Centre of Competence in 3D Digitization (VCC3D), dont l'objectif est de conseiller les institutions européennes tant sur le plan technique qu'économique. Parallèlement, le projet français TGE Adonis (Pinol, 2011) présente une offre approchante, mais sans activité de production 3D. Ce projet propose des infrastructures et des outils pour le stockage et l'archivage, mais laisse toute l'activité de production de données pour les archéologues. Archéovision propose un processus d'assistance pour les grands projets archéologiques en utilisant les technologies 3D (Dutailly *et al.*, 2012). Ce type d'infrastructure a un rôle majeur dans le développement de l'accès aux technologies 3D des acteurs du patrimoine culturel, dont les besoins et exigences sont très spécifiques. À l'échelle européenne et depuis plus récemment, ARIADNE (Niccolucci et Richards, 2013) a pour objectif de rassembler et de fusionner les différentes infrastructures existantes afin de permettre l'élaboration d'une plateforme numérique européenne d'accès aux données issues des recherches archéologiques.

1.2 Numérisation 3D de l'existant

Pour capter l'existant d'un site ou objet archéologique, des méthodes de numérisation 3D ont été développées depuis de nombreuses années par une large communauté. Afin de mieux les appréhender, nous avons essayé de regrouper différents travaux en les contextualisant avec les différents besoins des archéologues. Nous dégagerons dans cette section des pratiques de photogrammétrie (sous-section 1.2.3), lasergrammétrie (sous-section 1.2.4) et imagerie médicale (sous-section 1.2.7).

1.2.1 Contexte

La production 3D, autour de l'existant d'un site archéologique, peut être effectuée grâce à des techniques de photogrammétrie ou lasergrammétrie (Barsanti *et al.*, 2012). Ces productions peuvent apporter des réponses à des besoins scientifiques. Ceux-ci concernent notamment la préservation, l'analyse (Arles *et al.*, 2011), la restauration (Héno *et al.*, 2010) et la médiation architecturale, archéologique et du patrimoine culturel (Varea, 2006).

1.2.2 Origines théoriques

Dans sa thèse sur laquelle la suite de ce chapitre est fortement basée, Alain Fuchs indique que le relevé d'architecture semble avoir été théorisé au XV^{e} siècle (Fuchs, 2006). Il cite Jean-Paul Saint-Aubin qui identifie tout d'abord deux voies initiales menant d'une part à la photogrammétrie et d'autre part à la lasergrammétrie (Saint-Aubin, 1992).

1.2.2.1 Quelques travaux fondateurs pour la photogrammétrie

- Miroir de Brunelleschi
  En 1415, l'architecte, ingénieur et sculpteur florentin Filippo Brunelleschi (1377-1446) réalise un dessin du baptistère de Florence selon une perspective rigoureuse. Pour prouver la validité de sa perspective, il conçoit un dispositif qui permet de faire coïncider la réalité perçue avec sa représentation peinte. En se plaçant au lieu précis où il a peint le baptistère, Brunelleschi perce un trou dans son tableau à l'endroit du point de fuite, puis il le retourne. Entre le tableau et le monument, il place un miroir qui réfléchit la peinture. Ainsi, par le sténopé percé, il peut constater que sa peinture est en adéquation avec le baptistère réel (cf. figure 1.8). Il démontre ainsi les principes de la perspective artificielle (Millon et Lampugnani, 1997).

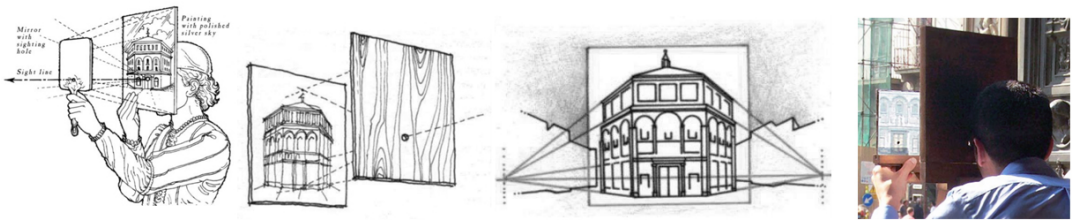


FIGURE 1.8 – Expérience de Brunelleschi (Millon et Lampugnani, 1997)

- Châssis à réseau de Dürer
  En 1525, le peintre Albrecht Dürer (1471-1528) décrit dans un ouvrage un dispositif pour dessiner en perspective (Dürer, 1525). Dans celui-ci, la position de l'œil de l'opérateur est fixée grâce à un œilleton et un châssis quadrillé fixe est placé entre cet œil et l'objet à représenter. Tout point de l'objet sera alors représenté en saisie ponctuelle par l'intersection du rayon lumineux joignant ce point à l'œil avec le plan du châssis (cf. figure 1.9).

Dans ces techniques, le rayon visuel s'intersecte avec le plan de la perspective et permet de définir la position des éléments de la scène sur un support plan. L'utilisation du plan de la perspective permet ainsi la mesure des points de l'espace. Les principes théoriques de ces techniques sont les mêmes que ceux à la base de la photogrammétrie, décrite plus en détail dans la suite de ce chapitre.

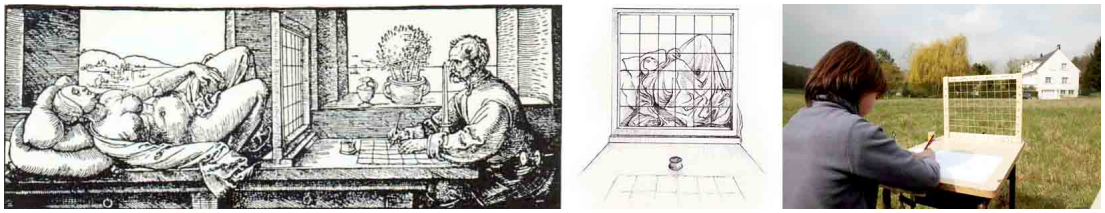


FIGURE 1.9 – Châssis à réseau de Dürer (Dürer, 1525)

1.2.2.2 Quelques travaux fondateurs pour la lasergrammétrie

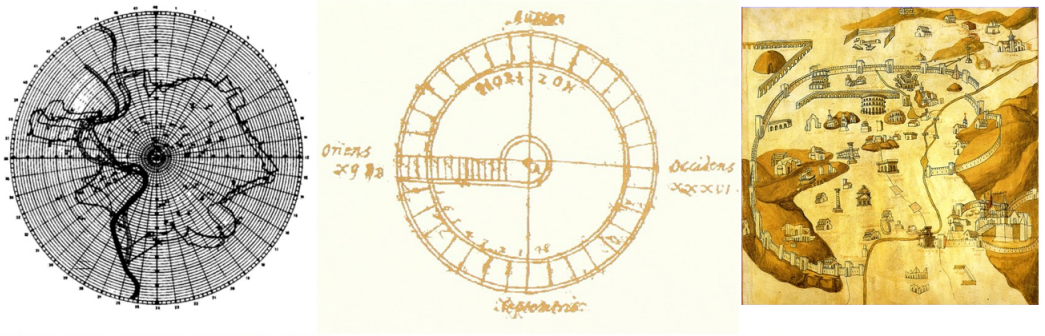
- La *Descriptio Urbis Romae* de Leon Battista Alberti (1404-1472) est un court texte du milieu du XV^{e} siècle qui décrit une méthode pour réaliser un plan de Rome (Alberti, 1553). D'après P. Moreno, il ne s'agit pas à proprement parler d'un relevé topographique, mais d'une retranscription dessinée de données issues d'un relevé déjà effectué (Paola, 2001). D'autres parlent cependant d'un outil de mesure de distances entre les édifices romains (Alberti et Queysanne, 2002). Quoi qu'il en soit, il semble que l'on peut parler dès lors du premier plan scientifique d'une ville et de première image digitalisée dans un système de coordonnées polaires (cf. figure 1.10). Quelques années plus tard en 1462, Alberti expose dans *De statua* une définition de l'art plastique tridimensionnel autour de la sculpture. Traduit des années plus tard, il s'agirait d'un texte précurseur du dessin 3D (Alberti, 2013).

- Portillon de Dürer
  Dans son ouvrage, Albrecht Dürer décrit une autre méthode pour dessiner en perspective (Dürer, 1525). Celle-ci nécessite un fil attaché à un mur, un cadre muni de deux fils perpendiculaires mobiles et un volet rabattable sur lequel est fixée une feuille à dessin (cf. figure 1.11). Cela permet de représenter, en saisie continue, un sujet en faisant coïncider l'image de la réalité avec sa reproduction sur un plan vertical.

Dans ces méthodes, il s'agit de relever des points caractéristiques de la scène dont les coordonnées sont définies en matière d'angles et de distances. Cette notion de relevé mènera quelques siècles plus tard à la création des théodolites, des distancemètres laser, des tachéomètres électroniques, et plus généralement à la lasergrammétrie (décrite également plus en détail dans la suite de ce chapitre).

1.2.2.3 Complémentarité des approches

Au début du XVI^{e} siècle dans son traité de perspective *De artificiali perspectiva* (Pelerin et Jousse, 1635), Jean Pèlerin montre qu'il existe un pont entre les deux voies qui, de ce fait, sont plus complémentaires que rivales. Il transmet une méthode, fondée sur deux points de distance (ou fuite), dans laquelle le dessinateur va représenter des éléments de la scène sur un quadrillage, comme pour le réseau de Dürer. Ce quadrillage en perspective est défini par deux lignes de fuites "tirées" vers l'horizon, comme avec le



—	"Corners" Of The Walls In Latium
×	"Apexes" Of The Walls In Latium
—	"Corners" Of The Walls In Trastevere
×	"Apexes" Of The Walls In Trastevere
—	"Corners" Of The Walls In The Leonine City
×	"Apexes" Of The Walls In The Leonine City
	Gates In Latium
	Gates In The Walls Of Trastevere
	Gates In The Walls Of The Leonine City
—	Central Line Of The River Tibet
	Ends Of The Island
	"Apexes" Of The Island
—	Banks Of The River
	"Apexes" Of The Banks Of The River
—	The Central Line Of The River Downstream Of The Bridge

1	Great Basilica of St Peter's	19	SS. Giovanni e Paolo
2	Meta	20	Santa Maria Maggiore
3	Castle	21	End of the aquaduct
4	Ospedale Santo Spirito	22	Baths
5	Torre di Parione	23	San Lorenzo in Panisperna
6	Sundial in the Campo dei Fiori	24	San Pietro in Montorio
7	Rotunda, the Pantheon	25	San Giacomo al Gianicolo
8	Antonine Column	26	Sant'Onofrio on the hill
9	Neor's house	27	San Pancrazio
10	Hadrian's Column or Torre Caritaria	28	Santa Prisca
11	Constantine's pediment	29	Santa Maria in Trastevere
12	Torre delle Milizie	30	San Crisogono
13	San Saba	31	San Vitale
14	Santa Balbina	32	Meta Pauli
15	San Giovanni a Porta Latina	33	San Pietro in Vincoli
16	San Giovanni in Laterano	34	Capitol
17	Santa Croce in Gerusalemme	35	Santa Maria in Aracoeli
18	Santo Stefano Rotondo		

FIGURE 1.10 – Reproduction d'un plan de Rome d'Alberti (Alberti, 1553), cercle d'Alberti permettant de référencer des points de Rome, carte de Rome dressée selon les concepts d'Alberti par Pietro del Massaio en 1469 (Duval-Arnould, 1999) et exemple de liste de points (Wong, 2012)

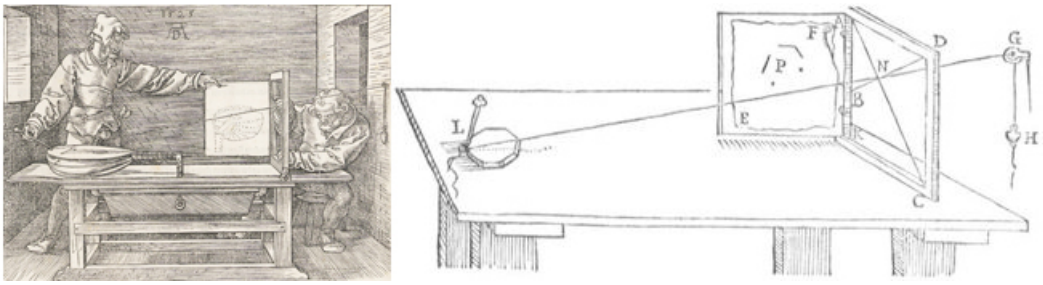


FIGURE 1.11 – Méthode de dessin en perspective en saisie continue (Dürer, 1525)

fil du portillon de Dürer (cf. figure 1.12). Bien qu'il existe de nombreux débats autour des influences de telle technique sur telle autre et de leur origine (Roccasecca, 2006), l'observation de la genèse de ces tentatives de reproduction de l'existant permet de mieux cerner les positions et impacts des techniques actuelles.

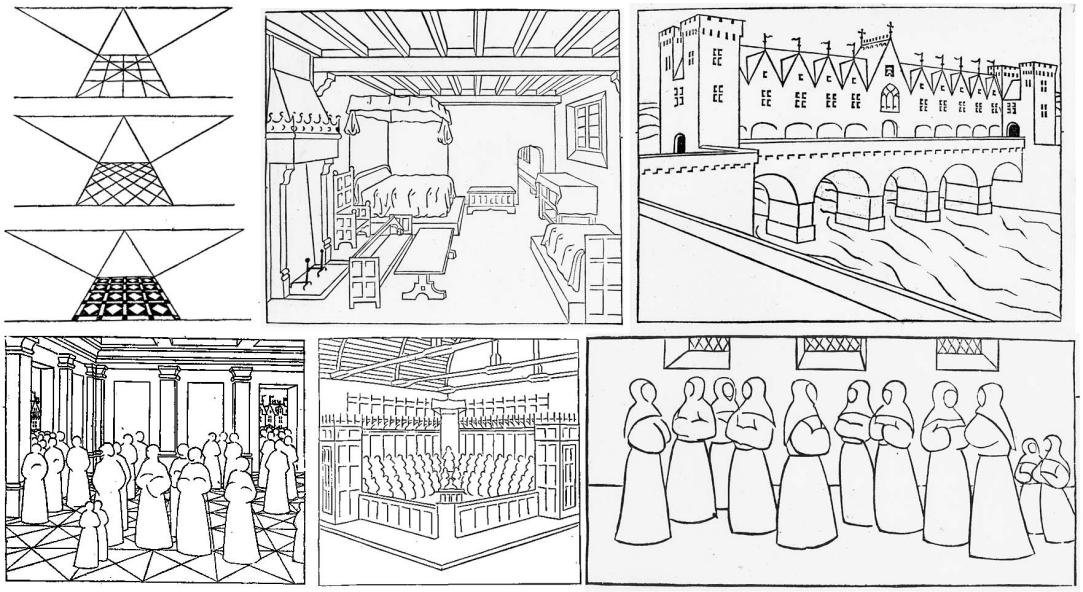


FIGURE 1.12 – Perspective à deux points de fuite de Jean Pèlerin (Pelerin et Jousse, 1635)

1.2.3 Photogrammétrie appliquée à l'archéologie

Nous allons tenter d'observer l'émergence de la photogrammétrie moderne, puis de cerner quelques aspects théoriques, pour enfin décrire brièvement des exploitations générales et utilisations en archéologie.

1.2.3.1 Brève histoire contemporaine et définitions

Les yeux et leurs rétines permettent à l'homme de percevoir le relief d'après deux images planes d'un objet. À partir de deux photos, il est possible d'effectuer le même processus. Avec Aimé Laussedat (1819-1907), Albrecht Meydenbauer (1834-1921) est l'inventeur de la photogrammétrie et la définit comme *la science (ou la technique) permettant d'obtenir des informations fiables sur l'espace naturel ou sur des objets physiques par l'enregistrement, la mesure et l'interprétation d'images photographiques ou produites par rayonnements électromagnétiques ou autres phénomènes* (Slama *et al.*, 1980).

En 1972, Henri Bonneval redéfinit la photogrammétrie comme *la technique qui permet de définir précisément les formes, les dimensions et la position spatiale d'un objet quelconque, en utilisant des mesures faites sur une ou plusieurs photographies de cet objet* (Bonneval, 1972). L'évolution des technologies de l'époque permettait en effet de

mettre un premier accent sur la précision des résultats. La photogrammétrie actuelle peut être qualifiée elle de correspondance d'image par corrélation dense. Longtemps aérienne, la photogrammétrie touche actuellement largement l'architecture et l'objet.

Plus concrètement, c'est à la fin du XIX^{e} siècle que des levés par exploitation graphique de photographies terrestres sont exécutés en Europe (Albertz, 2002) et au Canada (Deville, 1895). Viennent ensuite les stéréocomparateurs (Pulfrich, 1902) (Fourcade, 1903), stéréautographes (Thompson, 1908) et autres appareils de stéréorestitution (Poivilliers, 1922). La photogrammétrie appliquée à l'archéologie pousse un réel premier cri dans les années 1960 (Chevallier, 1969) (cf. figure 1.13).

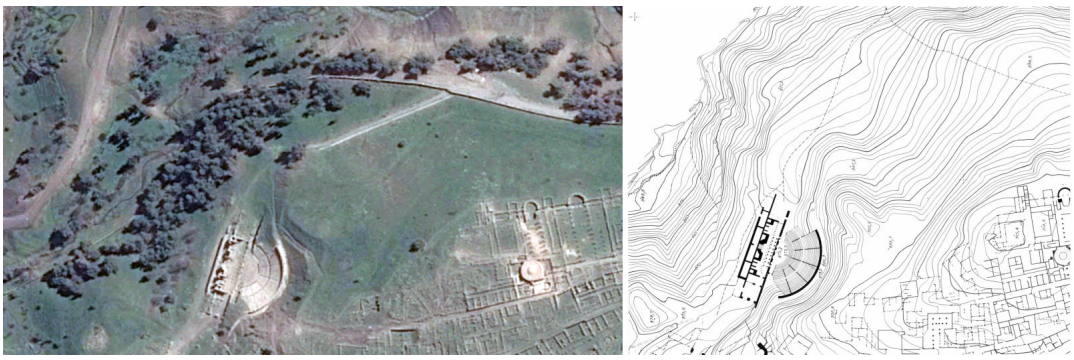


FIGURE 1.13 – Photo aérienne et levé photogrammétrique de la zone du théâtre de la cité antique de Djemila (Algérie) effectué dans les années 1960 (Chevallier, 1969)

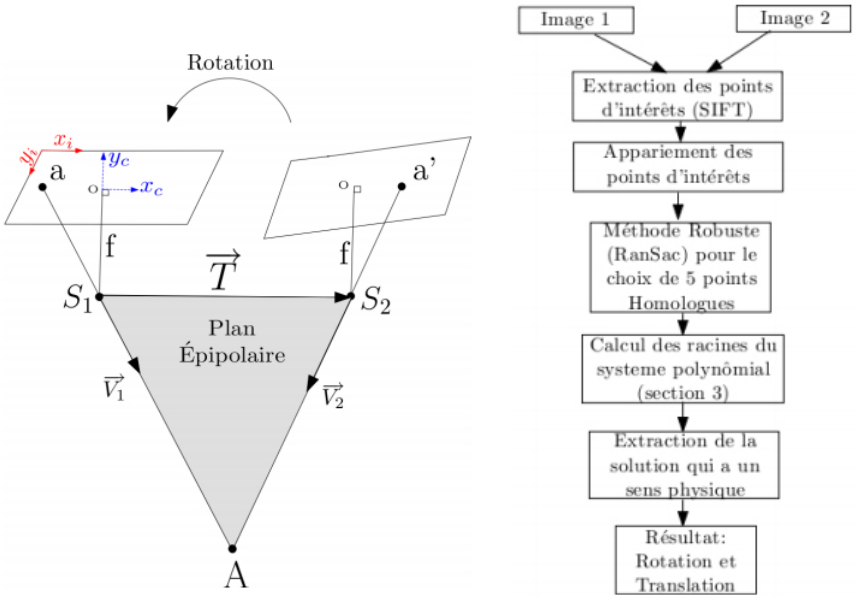
1.2.3.2 Mesure photogrammétrique

À partir des points identifiés comme homologues dans deux images (par l'homme ou automatiquement (Lowe, 2004)), l'objectif est de déterminer leur orientation (translation/rotation) relative (cf. figure 1.14). Pour cela, plusieurs méthodes existent. Parmi elles, on peut énoncer la condition de coplanarité qui s'énonce relativement simplement (cf. figure 1.14) et trouve résolution par calcul des racines du système polynomial induit (Kalantari *et al.*, 2009). Parmi les solutions trouvées, une et seulement une seule a un sens correspondant à la géométrie réelle de l'acquisition. Pour filtrer les solutions aberrantes, on s'assure d'abord que les points sont bien devant la caméra, que la profondeur moyenne de tous les points objets n'est pas trop petite, et que la solution sélectionnée est bien celle qui agrège le plus grand nombre de points (Kalantari *et al.*, 2009).

Il est à ce stade éventuellement possible d'obtenir l'orientation absolue de l'ensemble des images par une étape de stéréopréparation (mesure ou géoréférencement, dans la réalité, de points identifiés dans chaque image).

1.2.3.3 Exploitations photogrammétriques

Les techniques d'analyse d'image et de traitement du signal permettent d'effectuer des corrélations denses sur ces couples de clichés numériques et d'obtenir un nuage de points décrivant la surface des objets.



$$\overrightarrow{V_1}^t.(R\overrightarrow{V_2} \wedge \overrightarrow{T}) = 0$$

$$\begin{pmatrix} x_{a1} & y_{a1} & f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & Tz & -Ty \\ -Tz & 0 & Tx \\ Ty & -Tx & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{a2} \\ y_{a2} \\ f \end{pmatrix} = 0$$

FIGURE 1.14 – Illustration géométrique, différentes étapes d'un algorithme de calcul de l'orientation relative et des équations de coplanarité (Kalantari *et al.*, 2009)

Parallèlement, un ré-échantillonnage de chaque image corrigeant les effets dus à la perspective, doublé d'un assemblage de celles-ci, permet d'obtenir également des orthophotographies.

1.2.3.4 Utilisations en archéologie

- À l'échelle d'un site, la photogrammétrie est utilisée depuis de nombreuses années durant une fouille (cf. figure 1.15), sur des édifices architecturaux de plus en plus complexes (cf. figures 1.16, 1.17, 1.18 et 1.19) et même en milieu sous-marin (cf. figure 1.20).

FIGURE 1.15 – Photogrammétrie appliquée à la fouille archéologique : prise de vue dans les années 1960 (Whittlesey, 1966), orthophotographie (Matsumoto et Ono, 2009), avec relevé pierre à pierre (Prins et Adams, 2012) et géoréférencée (Rinaudo *et al.*, 2012)

FIGURE 1.16 – Rendus filaires issus de photogrammétrie des vestiges de la grotte de la momie (Canyon del Muerto - Arizona) (1) et du site Navajo Kin Bineola (Nouveau-Mexique) (2) (Lyons et Avery, 1977)

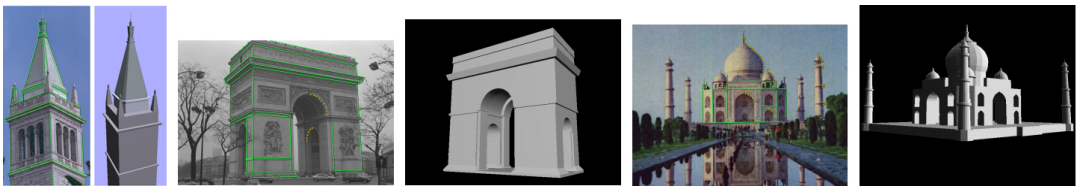


FIGURE 1.17 – Modèle 3D issu de photogrammétrie de la tour de l'horloge de Berkeley, de l'Arc de triomphe et du Taj Mahal (Debevec *et al.*, 1996)

- À l'échelle de l'objet, la photogrammétrie sur fragments de céramique a été l'une des premières applications contemporaines du développement de cette technique

FIGURE 1.18 – Modèle 3D issu de photogrammétrie du temple 'G1' de My Son (Vietnam) (Barazzetti *et al.*, 2011)

FIGURE 1.19 – Modèles 3D issu de photogrammétrie du château d'Ajlun (Jordanie) (Al-Adamat *et al.*, 2016), de l'église de San Sebastián de los Caballeros (Espagne) (Baños *et al.*, 2016) et de l'église d'Antiphonitis (Chypre du Nord) (Abate *et al.*, 2016)

appliquée dans la communauté archéologique (Kalantari et Kasser, 2007) (cf. figure 1.21). Plus récemment, et en raison de sa démocratisation, elle a été appliquée plus généralement à des artefacts (Nicolae *et al.*, 2014) (cf. figure 1.21), notamment pour de l'analyse (Clini *et al.*, 2016) et de l'impression 3D (Olson *et al.*, 2014) (Nicolas *et al.*, 2016) (cf. figure 1.22).

D'un point de vue logiciel, une étude comparative sur cinq applications, open source ou peu coûteuses, a été menée en 2012 (Remondino *et al.*, 2012). Pour certains, le niveau d'automatisation est tellement élevé que les auteurs les qualifient de boîtes noires. *Agisoft Photoscan* (Agisoft, 2011), *Apero* (Deseilligny et Clery, 2011), *Bundler* (Snavely *et al.*, 2008), *Photosynth* (Pomaska, 2009) et *VisualSfM* (Wu *et al.*, 2011) ont ainsi été testées sur six jeux de données dont les sujets vont de la simple sphère texturée au temple grec. *Agisoft Photoscan* offre de bons résultats et malgré (pour les informaticiens)/grâce à (pour les archéologues) son haut niveau d'automatisation, il reste aujourd'hui largement utilisé en archéologie (De Reu *et al.*, 2013).

1.2.4 Lasergrammétrie appliquée à l'archéologie

Sur le même principe que précédemment, nous relaterons quelques définitions et travaux illustrant l'arrivée de la lasergrammétrie dans le champ scientifique. Nous tenterons ensuite d'explorer quelques principes théoriques et utilisations en archéologie.

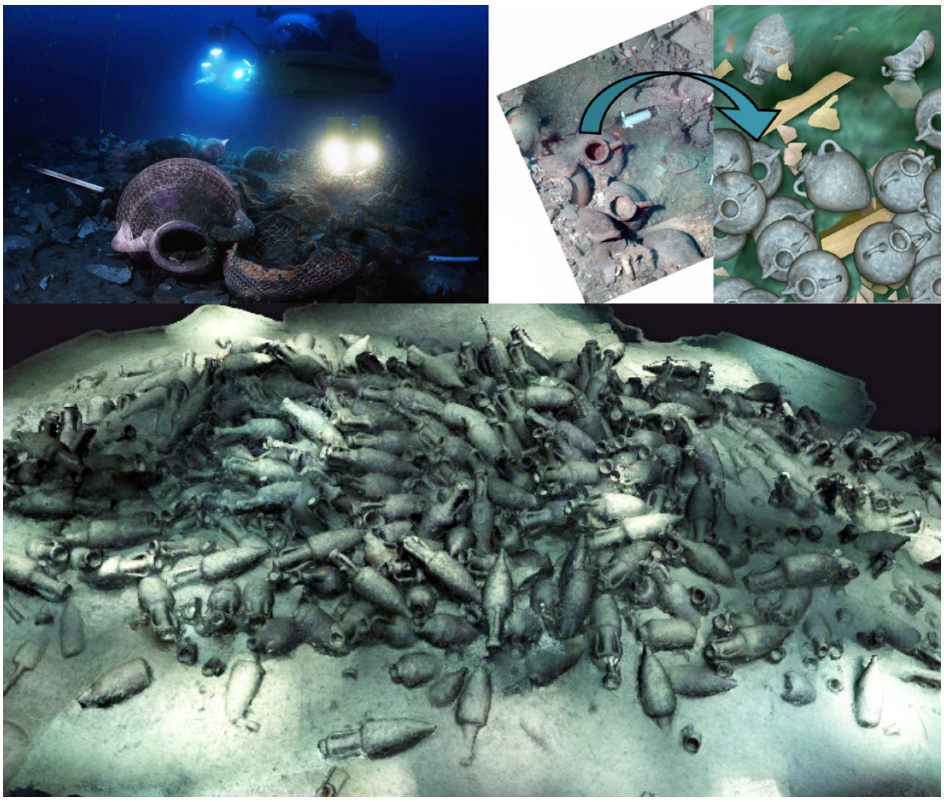


FIGURE 1.20 – Photogrammétrie sur l'épave du Grand Ribaud (haut) (Drap, 2012) et sur une épave au large du Cap Bénat (profondeur 4328m, 12000 photos, 250 millions de points) (Drap *et al.*, 2015)

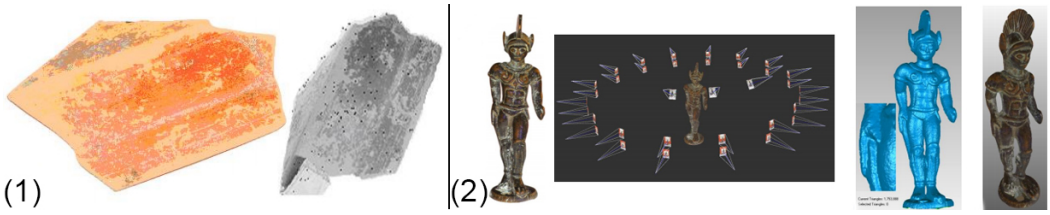


FIGURE 1.21 – Photogrammétrie sur fragments de céramique (1) (Kalantari et Kasser, 2007) et artefact (2) (Nicolae *et al.*, 2014)

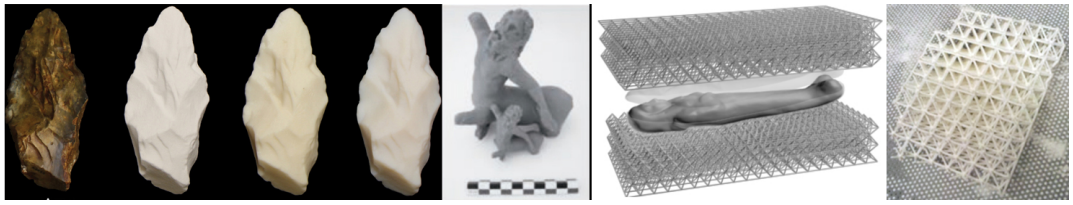


FIGURE 1.22 – Impression 3D d'un biface acheuléen (Olson *et al.*, 2014), d'une statuette de centaure à différentes échelles (Nicolas *et al.*, 2016) et d'un essai d'emballage pour artefact fragile (Sá *et al.*, 2012)

1.2.4.1 Brève histoire contemporaine et définitions

La lasergrammétrie est une technique d'acquisition par un scanner laser 3D, système utilisant la lumière laser comme support d'information (Landes et Grussenmeyer, 2011). Depuis une position définie où l'appareil est stationné, l'acquisition se fait par un balayage laser terrestre qui permet l'obtention rapide, sans contact et automatique de coordonnées 3D de points surfaciques visibles. R. Staiger indique qu'il est difficile de déterminer quelle entreprise a été la première à commercialiser le premier laser-scanner 3D (Staiger, 2011). Il évoque cependant l'arrivée sur le marché du CYRAX-Scanner (États-Unis) et du RIEGL LMS Z210 (Autriche) au milieu des années 1990. Plus tôt, des travaux de recherche sur la conception d'un scanner laser 3D haute précision ont cependant été menés au Canada durant les années 1980 (Blais *et al.*, 1988) (Rioux, 1984). De leur côté, Shan et Toth évoquent l'arrivée du Callidus CP 3200 (Allemagne) en 1996 (Landes et Grussenmeyer, 2011) et ce fait semble confirmé par un test de performance assez complet [1] réalisé par M. Lemmens (Lemmens, 2007). Côté français à la même époque, l'EDF et l'entreprise MENSI utilisent la caméra laser tridimensionnelle SOISIC au sein d'une centrale nucléaire pour effectuer des relevés sur ses équipements à la vitesse de 100 points colorisés par seconde (Thibault et Smadja, 1996).

1.2.4.2 Principes physiques et théoriques

Les scanners laser actuels utilisent différentes méthodes de mesure de distance. Ces méthodes sont bien expliquées et comparées dans le mémoire de Florent Poux (Poux, 2014). Leurs définitions peuvent également être complétées par d'autres publications (Maumont, 2010) (Wehr et Lohr, 1999).

– La triangulation : un rayon laser émis est détourné de sa direction par un miroir mobile et son angle incident est mesuré à la source par une caméra CCD. L'angle du rayon laser réfléchi par l'objet est mesuré par une autre caméra CCD disposée dans le plan de balayage du miroir (cf. figure 1.23).

1. http://www.utdallas.edu/research/interface/Resources/LASERSCANNERS/productsurvey_v_pdfdocument_18.pdf

Cette technique est appelée triangulation parce que le point laser (sur l'objet) et les deux caméras forment un triangle dont on connait un côté de distance d (entre le laser et le capteur) et deux angles adjacents à la base. L'angle à l'émetteur peut varier, car le faisceau est souvent dirigé par un dispositif de déviation (miroir). L'angle au capteur peut par conséquent aussi varier et est déterminé grâce à la position du faisceau d'arrivée sur la matrice CCD.

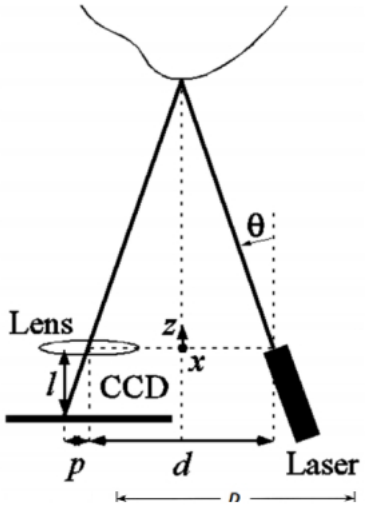


FIGURE 1.23 – Principe de la triangulation (Poux, 2014)

- Le temps de vol *(pulse method)* : il s'agit de mesurer le temps Δt que met le faisceau laser pour faire l'aller-retour entre la station et la surface visée. Les angles sont définis notamment par des miroirs rotatifs. La distance s'évalue de la sorte $D = \frac{C_0 \Delta t}{2n}$ (C_0 correspond à la vitesse de la lumière dans le vide et n l'indice du milieu).
- La différence de phase *(phase shift)* : il s'agit de mesurer le décalage de phase entre les signaux de la lumière émise et ceux de la lumière reçue. La distance s'évalue de la sorte $D = \frac{C_0 \Delta \phi}{4\pi f}$ avec f est la fréquence du signal sinusoïdal et $\Delta \phi$ s'obtient par la relation présentée dans la figure 1.24.

$$\int_0^T S_{émis} * S_{capté}\, \mathrm{d}t = \frac{1}{2} * \int_0^T (cos(2\omega t + \Delta\phi) + cos(\Delta\phi))\, \mathrm{d}t = \frac{T}{2} * cos(\Delta\phi)$$

FIGURE 1.24 – Relation permettant d'obtenir la différence de phase $\Delta\phi$ du laser utilisant la technique du même nom

F. Poux établit donc aussi un tableau de comparaison des méthodes de télémétrie laser sur trois critères (Table 1.1) : portée, précision et vitesse d'acquisition (Poux, 2014).

TABLE 1.1 – Comparaison des méthodes de télémétrie laser (Poux, 2014)

	Portée	**Précision**	**Vitesse d'acquisition**
Triangulation	+	+++	+
Temps de vol	+++	+	++
Phase différentielle	++	++	+++

1.2.4.3 Utilisations en archéologie

Comme dans le cas de la photogrammétrie, le relevé laser est largement utilisé sur des fouilles (cf. figure 1.25) et sur des édifices architecturaux de plus en plus élaborés (cf. figures 1.26 et 1.27). Une comparaison des techniques sera développée dans la suite du chapitre, mais il est d'ores et déjà possible de dire que le rapport "coût du matériel/précision de l'acquisition" influe considérablement dans le choix de la technique. Pour cette raison, il existe notamment des utilisations de scanner pour les objets, mais la photogrammétrie semble plus utilisée dans ces cas (Böhler et Marbs, 2004). La précision géométrique des résultats assurée par la lasergrammétrie semble enfin jouer lorsque les besoins en matière d'analyse sont conséquents (Cassen *et al.*, 2014) (Bertolini-Cestari *et al.*, 2016).

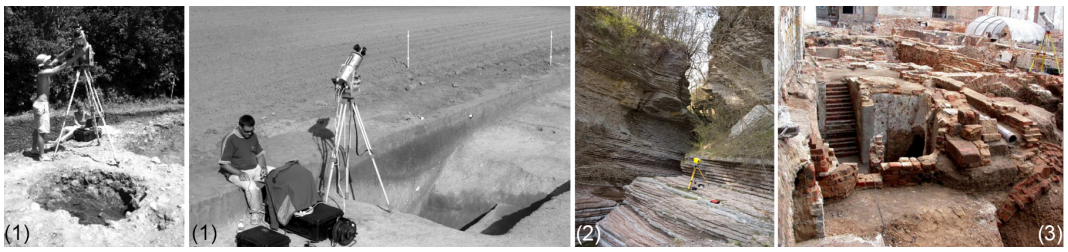


FIGURE 1.25 – Relevé laser sur une fouille de l'oppidum de Burg (Autriche) (1) (Doneus et Neubauer, 2005), d'une coupe stratigraphique en Italie (2) (Franceschi, 2008) et d'un site urbain à Leipzig (3) (Neubauer et Doneus, 2008)

1.2.5 Traitement des données 3D numérisées

Dans sa thèse, Thomas Chaperon (Chaperon, 2002) décrit un processus de traitement des nuages de points issus de l'acquisition 3D par lasergrammétrie.

Durant celui-ci et outre l'export, des étapes de consolidation, segmentation et polygonisation viennent compléter l'acquisition. Excepté la phase de consolidation, les autres phases sont également applicables à tout nuage de points issu de la photogrammétrie.

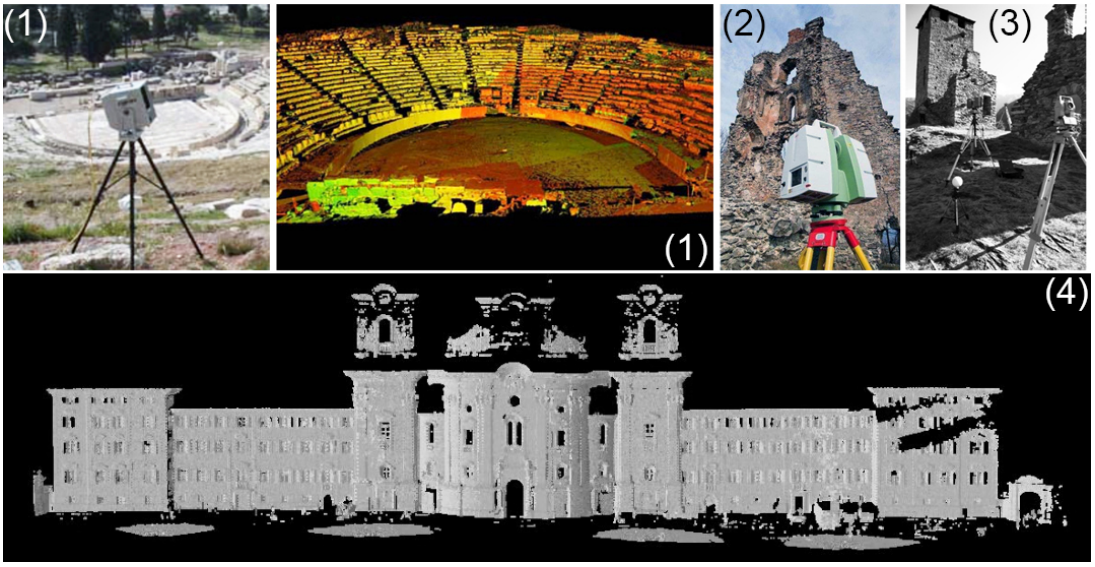


FIGURE 1.26 – Relevé laser du théâtre de Dionysos (1) (Vozikis *et al.*, 2004), du château de Slanec (Slovaquie) (2) (Bartoš *et al.*, 2011), de Graines (Italie) (3) (d'Agostino *et al.*, 2013) et nuage de points de l'abbaye territoriale d'Einsiedeln (Suisse) (4) (Ingensand *et al.*, 2003)

FIGURE 1.27 – Relevé laser de l'église Sainte-Marie de Staines (Italie) (Barrile *et al.*, 2016), du pont baroque de Královà pri Senci et de la ville de Banská Łtiavnica (Slovaquie) (d'Agostino *et al.*, 2013)

1.2.5.1 Consolidation

L'opération consiste à insérer les sous-nuages de points, orientés selon un référentiel relatif à la station (ou prise de mesure) correspondante, dans un repère global. Il existe plusieurs méthodes de recalage dans un référentiel unique (Chen et Medioni, 1992) (Besl et McKay, 1992). Après contrôle, il s'agit de fusionner des nuages de points recalés. Les principaux scanners 3D proposent des solutions logicielles qui réalisent cette opération et sont fournies avec le matériel. Leur prise en main est relativement aisée, car ils ouvrent directement les formats propriétaires issus du matériel et permettent, après la consolidation, d'exporter un nuage de points en format classique. Parmi ces logiciels, on peut citer le logiciel SCENE (Balletti *et al.*, 2013) fourni avec le scanner FARO Focus 3D X 330 évoqué plus loin.

1.2.5.2 Segmentation

La segmentation consiste en un nettoyage des données pour ne garder que l'essentiel. L'utilisateur sélectionne manuellement des zones de l'espace de visualisation afin d'isoler des ensembles de points. Une référence en matière d'édition est le logiciel CloudCompare (Girardeau-Montaut, 2011) qui est basé sur une structure *octree* particulièrement optimisée et permet de traiter et d'afficher de très gros nuages de points. En plus des outils de segmentation manuelle, il propose des fonctions de segmentations automatiques (extraction des composantes connexes, segmentation par propagation d'un front, etc.), projections (selon un axe principal, développées sur un cylindre ou un cône, etc.), recalage (ICP, etc.), calculs de distances (distance au plus proche voisin entre deux nuages ou entre un nuage et un maillage, etc.), calculs statistiques (test du χ^2 spatial, etc.) et d'estimation de propriétés géométriques (densité, courbure, rugosité, orientation géologique, etc.).

1.2.5.3 Polygonisation

Afin d'obtenir une visualisation complète où une surface remplace les points, une polygonisation du nuage est possible. Cette phase se déroule en général en trois étapes. Un prétraitement du nuage va éliminer les points parasites dus notamment au bruit de mesure. Un algorithme va ensuite construire les facettes entre les différents points du nuage par triangulation. Le maillage va être enfin optimisé pour faire disparaître des artefacts indésirables (trous, morphologies "extrêmes" de triangles) et être éventuellement allégé. De nombreux travaux concernent ces opérations. Par exemple en 2001, J. C. Carr (Carr *et al.*, 2001) introduit des *Fonctions de Base Radiale* (RBFs en anglais) "polyharmoniques" permettant de construire des surfaces lisses à partir de nuages de points et de réparer des maillages incomplets (cf. figure 1.28).

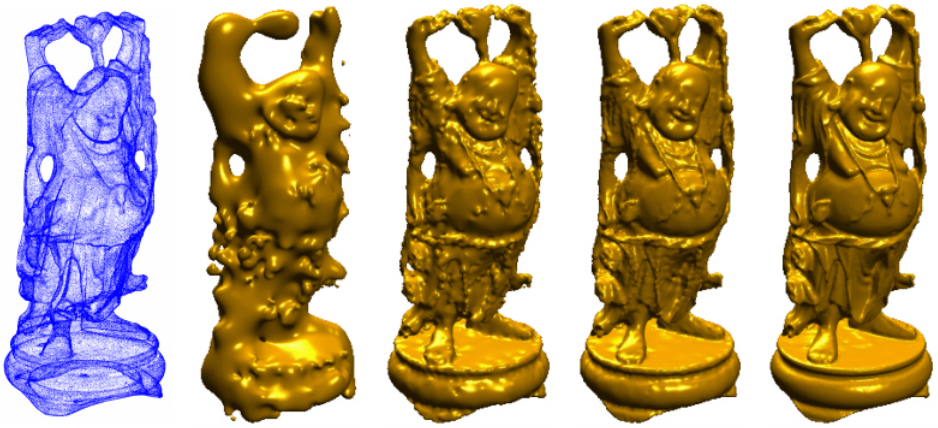


FIGURE 1.28 – Algorithme glouton faisant épouser itérativement une Fonction de Base Radiale sur un nuage de points (Carr *et al.*, 2001)

En 2006 (Kazhdan *et al.*, 2006), M. Kazhdan montre que la construction d'une surface à partir de points orientés (c.-à-d. avec normale) peut être effectuée en résolvant une équation de Poisson du type : $\Delta\chi \equiv \nabla.\nabla\chi = \nabla.\vec{V}$. Il s'agit de calculer la fonction scalaire χ dont le Laplacien est égal au divergent du champ de vecteurs $\vec{V}$, constitué par le nuage de points orientés (cf. figure 1.29). Son algorithme, largement utilisé aujourd'hui dans la communauté des producteurs de données archéologiques 3D, a une complexité proportionnelle à la taille du nuage initial. M. Kazhdan le compare ensuite avec d'autres techniques (cf. figure 1.30) et l'améliore en 2013 en lui permettant une meilleure fidélité géométrique et l'utilisation d'un solveur plus rapide (Kazhdan et Hoppe, 2013).

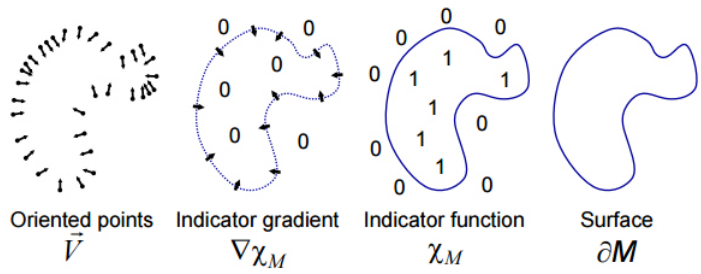


FIGURE 1.29 – Reconstruction en 2D par l'algorithme de Poisson (Kazhdan *et al.*, 2006)

Concernant le traitement des maillages 3D conséquents obtenus, le logiciel libre MeshLab reste largement utilisé en archéologie et en gestion du patrimoine culturel (Cignoni *et al.*, 2008). Celui-ci propose notamment différents filtres de nettoyage, des outils de re-maillage et des fonctions de suppression de bruit.

FIGURE 1.30 – Reconstruction en 3D du lapin de Stanford par les méthodes Power Crust (Kazhdan *et al.*, 2006), Robust Cocone (Dey et Goswami, 2004), Fast RBF (Carr *et al.*, 2001), MPU (Ohtake *et al.*, 2005) et reconstruction de Poisson (Kazhdan *et al.*, 2006)

1.2.5.4 Anastylose

Effectuée plus rarement, car nécessitant des compétences archéologiques et temps d'études très importants, l'anastylose (virtuelle) est la *technique de reconstruction d'un monument en ruines grâce à l'étude méthodique de l'ajustement des différents éléments qui composent son architecture* (Wikipedia, 2016a). Parmi les expériences menées autour de cette pratique, nous pouvons citer celle d'une équipe formée de plusieurs partenaires (EDF, INRIA, ENST, MENSI et IIM) qui a bâti une méthode de remontage de la colonne des danseuses de Delphes en 3D, permettant de vérifier des hypothèses archéologiques (Martinez, 2007). Trente-quatre fragments à raccorder ont ainsi été remontés virtuellement (cf. figure 1.31). Associée à l'impression 3D, elle permet notamment de restaurer des objets fragmentés (Arbace *et al.*, 2013) (cf. figure 1.32).

1.2.6 Analyses comparatives

Dans sa thèse, Alain Fuchs sépare d'un côté l'acquisition des données et leur traitement, et de l'autre la constitution du modèle tridimensionnel à partir des mesures. Avant d'en effectuer une (Fuchs *et al.*, 2003), il évoque ensuite plusieurs analyses comparatives antérieures. Celles-ci concernent les résultats de l'acquisition elle-même (Scherer, 2002) (Guarnieri *et al.*, 2004) (Kadobayashi *et al.*, 2004), la qualité des modèles 3D obtenus (De Luca, 2006) mais aussi l'association des deux techniques (Fuchs *et al.*, 2003). À partir de ces comparaisons, il observe plus de similitudes que de réelles oppositions et conclut qu'en raison de la diversité des natures et des formes, les deux techniques gagnent à s'appliquer simultanément. Il conclut également qu'une solution souple consiste à réaliser un relevé par lasergrammétrie et d'effectuer dans le même temps une couverture photographique complète de la scène.

Plus récemment, S.G. Barsanti a proposé en 2012 une analyse comparative des deux techniques utilisées dans le domaine archéologique sur les murs de l'ancienne ville Byzantine d'Aquilée (Barsanti *et al.*, 2012). En 2016, une analyse similaire pour l'étude

FIGURE 1.31 – Anastylose virtuelle de la colonne des danseuses de Delphes (Martinez, 2007)

FIGURE 1.32 – Réassemblage, impression 3D et positionnement d'un buste d'une Madonne détruite par un tremblement de terre (Arbace *et al.*, 2013)

géologique d'affleurements est réalisée au sujet d'une carrière de calcaire carbonifère dans le nord-est de l'Angleterre et de roches calcaires fracturées du Crétacé près de Ras al-Khaimah (Émirats arabes unis) (Wilkinson *et al.*, 2016). Même si elle s'éloigne de l'archéologie, cette comparaison complète fortement la précédente et représente un réel intérêt, car la numérisation des roches implique des géométries naturelles (anguleuses, fractales, etc.) et des textures répétitives, qui représentent un véritable défi notamment pour la photogrammétrie. Si les impératifs budgétaires constituent le principal facteur explicatif, le tableau 1.2 permet une compréhension plus fine des choix opérés par les archéologues entre les deux techniques.

TABLE 1.2 – Analyse comparative lasergrammétrie/photogrammétrie (Wilkinson *et al.*, 2016)

	Photogrammétrie	**Scan laser**
Considérations pratiques		
Coût habituel	Élevé (50k-200k$)	Bas (650-10k$)
Poids	Élevé (15-50 kg)	Bas (2-15 kg)
Taille lorsque emballé pour le transport	Large (petite valise)	Petite (format sac-à-dos)
Nombre d'opérateurs requis	1+	1+
Niveau de formation de l'opérateur	Modéré	Modéré-élevé
Certitude de succès (pour les applications critiques)	Élevée (résultats disponibles immédiatement)	Modérée (les résultats finaux ne sont connus qu'une fois les images traitées)
Résultats immédiats sur le terrain	Oui	Non
Temps d'acquisition	Comparable à la lasergrammétrie	Comparable à la photogrammétrie
Précision	Élevée (2-8 mm, principalement indépendant de la portée)	Ultra-haute à ultra-basse (dépendante de la résolution d'image et de la portée)
Exactitude	env 5cm (dépendante du GPS)	env 5cm (dépendante du GPS)
Détail (espacement entre points)	Faible ou élevé (dépendant de la portée)	Faible ou élevé (dépendant de la portée)
Cohérence interne (évaluation du degré de fiabilité)	Élevée	Modérée (les résultats finaux ne sont connus qu'une fois les images traitées)

Temps de traitement	Bas (Minutes à heures)	Élevé (Heures à jours, dépendant du poste de travail et des détails souhaités)
Donnée supplémentaire	Intensité de réflexion laser par point	Normale à la surface
Polyvalence d'applications	Élevée	Modérée (dépendant de l'expérience de l'opérateur)
Possibilité de reprendre le relevé plus tard	Élevée	Modérée (dépendant de l'aspect du sujet)
Relevé sur plusieurs jours sans alimentation secteur	Modéré (les batteries supplémentaires sont relativement chères, volumineuses et lourdes)	Élevé (les batteries supplémentaires relativement peu coûteuses, petites et légères)
Opération à distance pour relevé temporel	Oui	Non: contrôlé par l'opérateur
Acquisition automatisée	Oui	Non: contrôlé par l'opérateur
Dépendance aux données issues d'autres sources	Basse (le système de positionnement par satellites fournit l'orientation et l'emplacement)	Modérée (le système de positionnement par satellites fournit l'échelle, l'orientation et l'emplacement)
Dépréciation de la valeur de l'équipement	Basse	Basse-modérée
Robustesse	Modérée	Modérée
Disponibilité	Basse	Modérée-élevée
Facilité de maintenance et disponibilité des pièces de rechange	Basse-modérée	Modérée-élevée
Equipement utilisé à d'autres fins?	Non	Oui
Facilité de transport, d'import et / ou d'export	Basse-modérée	Élevée
Performances relatives dans diverses conditions d'utilisation		
Pluie	Modérées	Basses
Brouillard	Basses	Très basses
Poussière	Modérées	Basses
Vent fort	Basses	Modérées

Températures basses (inférieures à 0°C)	Basses-modérées	Modérées
Températures élevées (supérieures à 40°C)	Modérées	Modérées-élevées
Lumière directe du soleil sur le capteur	Élevées	Basses
Acquisition à faible luminosité ou nocturne	Élevées	Basses
Très courte portée (<1m)	Basses	Élevées
Longue portée (>300 m)	Élevées	Basses-élevées

1.2.7 Imagerie médicale

L'étude de l'intérieur d'un artefact archéologique est rendue possible grâce aux évolutions des techniques d'imagerie médicale. Sans rentrer dans les détails de ce sujet vaste et complexe, on peut au moins citer la radiographie (rayons X), la tomodensitométrie (rayons X), l'imagerie par résonance magnétique (aimantation des atomes d'hydrogène ou mesure de la désoxy-hémoglobine des globules rouges) et l'échographie (ultrasons). La radiographie et la tomodensitométrie se prêtent bien à l'archéologie, car elles permettent de sonder de façon non invasive le non-vivant.

Utilisée dès 2005, la tomodensitométrie a permis par exemple de détecter un trou à l'intérieur d'une figurine néolithique anthropomorphe découverte au kibboutz Shaar Hagolan (Israël). De cette "anomalie", les archéologues peuvent déduire et justifier la technique de construction de la figurine (cf. figure 1.33) (Applbaum et Applbaum, 2005).

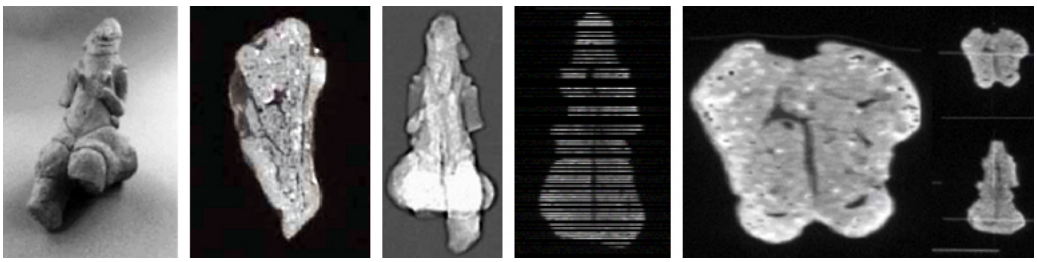


FIGURE 1.33 – Figurine anthropomorphe de Shaar Hagolan / section longitudinale / radiographie / section sur plan coronal / section et détection d'une anomalie (Applbaum et Applbaum, 2005)

L'extraction d'un artefact de la fouille peut porter atteinte à son intégrité. Un couplage de radiographie et tomodensitométrie sur un bloc de terre issu de la nécropole de Villalfonsina (Italie) a permis de découvrir une ceinture métallique avant son extraction (cf. figure 1.34) (Stelzner *et al.*, 2010).

Dans la même logique, il est aussi possible d'acquérir un modèle 3D d'artefacts contenus dans un autre, qu'il peut être problématique de détruire. L'exemple de l'urne

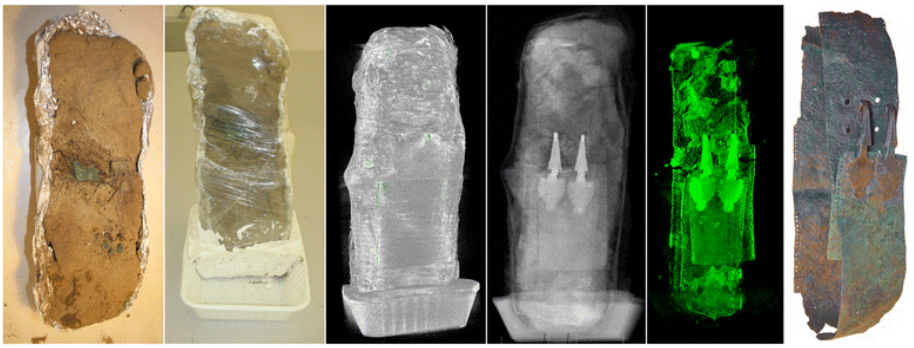


FIGURE 1.34 – Radiographie sur un bloc de terre issu de la nécropole de Villalfonsina (Italie) et ceinture métallique extraite (Stelzner *et al.*, 2010)

funéraire est particulièrement parlant. L. Harvig a ainsi pu obtenir le volume 3D du contenu incinéré dans une urne funéraire danoise (cf. figure 1.35) (Harvig *et al.*, 2012).

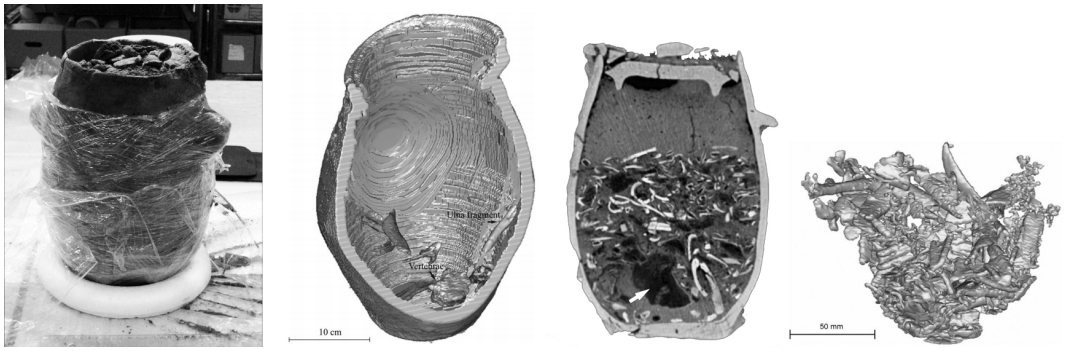


FIGURE 1.35 – Urne funéraire de Rishøjen (péninsule du Jutland / Danemark) / écorché de la numérisation par tomodensitométrie de l'urne et des restes d'os contenus / vue en coupe / volume 3D du contenu incinéré (Harvig *et al.*, 2012)

À partir du volume 3D obtenu, il vient naturellement des ambitions de reconstitution. Ainsi après une numérisation au département de radiologie de l'hôpital St Thomas de Londres, le modèle 3D du crâne d'une momie égyptienne a servi de base à la tentative de reconstitution dessinée de son visage (cf. figure 1.36) (Hughes, 2011).

Étape ultime pour l'analyse d'un artefact masqué par son contenant, l'impression 3D permet une étude fine ne nécessitant pas de compétence informatique. Des expériences ont ainsi été menées autour d'objets en or de l'Âge du bronze découverts en Allemagne (cf. figure 1.37) (Hassmann *et al.*, 2012) et d'une pièce rare issue d'un jeu d'échecs cantonais (cf. figure 1.38) (Laycock *et al.*, 2012).

Les techniques d'imagerie médicale représentent un troisième pilier des méthodes de numérisation 3D, au même titre que la photogrammétrie et la lasergrammétrie. Les contributions détaillées dans la suite de ce manuscrit ne vont évoquer que deux

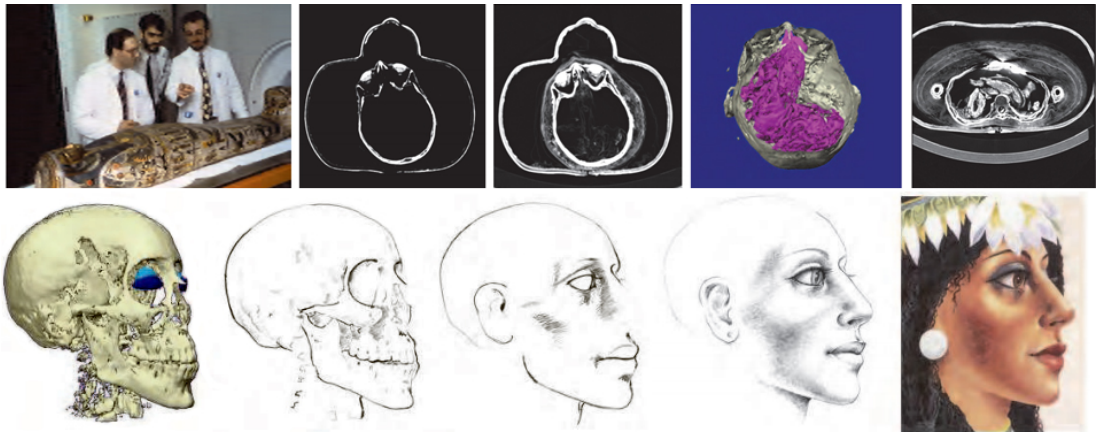


FIGURE 1.36 – Momie égyptienne numérisée au département de radiologie de l'hôpital St Thomas de Londres en 1991 / ajustement des plages de valeurs des pixels affichés / reconstruction 3D de la moitié inférieure de la tête / coupe au niveau de l'abdomen / étapes de dessin d'une reconstitution à partir d'une vue 3D du crâne (Hughes, 2011)

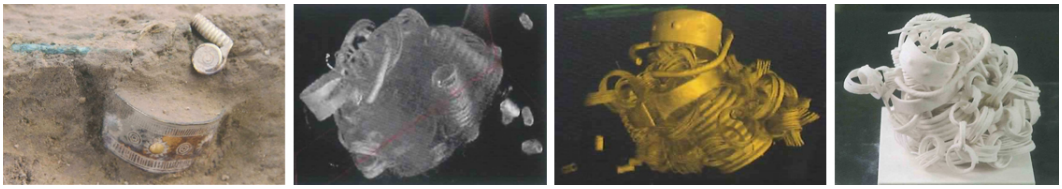


FIGURE 1.37 – Objets en or de l'Âge du bronze découverts à Gessel (Allemagne) / tomodensitométrie effectuée à l'Université Gottfried Wilhelm Leibniz de Hanovre / radioscopie (société YXLON) / impression 3D (Hassmann *et al.*, 2012)

FIGURE 1.38 – Pièce d'un jeu d'échecs cantonais sculpté dans l'ivoire en 1880 / micro-tomographie aux rayons X / impression 3D (Laycock *et al.*, 2012)

cas d'utilisation (reconstitution sonore et tracéologie) sur objets dont l'intérieur n'est, pour l'heure, pas concerné par quelconque analyse (4.1.3). En raison de la technicité de l'opérateur requise, celles-ci peuvent en effet constituer la base d'un futur sujet de thèse, notamment sur ces intérieurs cachés d'artefacts.

1.3 Modélisation 3D de l'hypothétique

Clairement distinguée dans cette thèse de la numérisation 3D, la modélisation 3D de l'hypothétique amène une implication des archéologues nettement supérieure au sens où leur savoir constitue la matière première du processus de restitution. Là encore au travers d'exemples, nous tenterons d'esquisser quelques principales orientations. En partant de quelques aspects des théories architecturales (sous-section 1.3.1), nous aborderons des problématiques issues des pratiques de modélisations 3D de l'hypothétique (sous-section 1.3.2) (cf. figure 1.1).

1.3.1 Origines théoriques et architecturales

Une grande majorité de restitutions archéologiques concerne et a concerné l'architecture. Nous nous concentrerons pour l'instant dans cette partie sur ce domaine.

1.3.1.1 Typologie

Au début du XIX^{e} siècle, Jean-Nicolas-Louis Durand développe une typologie analytique à partir des plans en constituant un catalogue de références typologiques et de règles pour la conception architecturale (cf. figure 1.39) (Durand et Normand, 1819). Celles-ci portent sur le cadre bâti et l'ensemble de son environnement. Plus tard au XX^{e} siècle, d'autres travaux concernent l'échelle urbaine (Panerai *et al.*, 1999). La représentation contribue à l'analyse typologique *qui rassemble les propriétés essentielles d'une catégorie d'objets réels et permet d'en rendre compte avec économie* (cf. figure 1.39) (Panerai *et al.*, 1999).

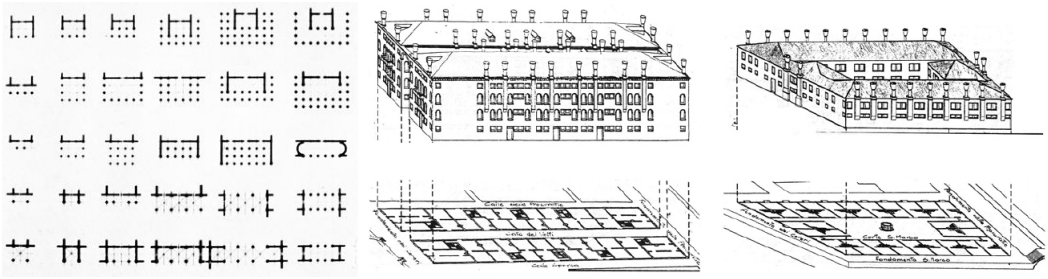


FIGURE 1.39 – Typologies de portiques (Durand et Normand, 1819) et de tissus urbains (Panerai *et al.*, 1999)

1.3.1.2 Définitions

Toujours dans sa thèse, Alain Fuchs évoque trois notions essentielles aux stratégies de restitution d'architecture.

- Proportion : *Rapport de grandeur entre les parties d'une chose, entre une des parties et le tout, défini par référence à un idéal esthétique* (Robert, 1988).
- Ordre (cf. figure 1.40) : *Dans l'architecture antique et classique, système cohérent de proportions modulaires et de formes appliquées aux élévations. L'usage des ordres n'implique pas nécessairement l'emploi des pilastres ou des colonnes; les règles de l'ordre s'imposent théoriquement à toutes les parties de l'élévation.* (Blondel, 1993)
- Style : *Ensemble de caractères d'une œuvre qui permettent de la classer avec d'autres dans un ensemble constituant un type esthétique* (Robert, 1988).

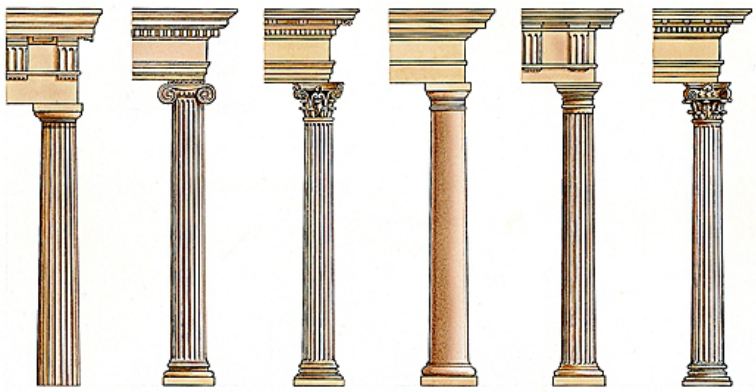


FIGURE 1.40 – Ordres grecs et romains : dorique, ionique, corinthien, toscan, dorique romain et composite

Celles-ci permettent, comme pour l'analyse typologique, de percevoir quelques enjeux inhérents aux restitutions architecturales.

1.3.1.3 Modes de représentation

Les objectifs "classiques" de la représentation de l'architecture bâtie sont :

- Fixer l'objet d'étude dans sa morphologie et ses dimensions
- Hiérarchiser objectivement les relations entre les différents éléments de l'objet d'étude
- Obtenir une description la plus complète possible avec le minimum de moyens

Il existe plusieurs techniques de représentation graphique dont le choix dépend de multiples facteurs (ampleur, degré de détail, profession du destinataire, pratiques, conventions, etc.). Parmi elles, on trouve le dessin géométral, axonométrique et en perspective (cf. Table 1.3 et figure 1.41).

TABLE 1.3 – Techniques de représentation graphique de l'architecture bâtie (Barsanti *et al.*, 2012)

	Dessin géométral : plans, coupes et élévations	**Dessin axonométrique**	**Dessin en perspective**
Projection	Orthogonale sur au moins deux plans	Orthogonale sur un plan	Conique à partir d'un point de vue donné sur un plan
Représentation du sujet	Tel qu'il est en soi sans déformation de perspective	Tel qu'il serait vu par un observateur placé à l'infini	Tel que l'observateur le voit dans la réalité

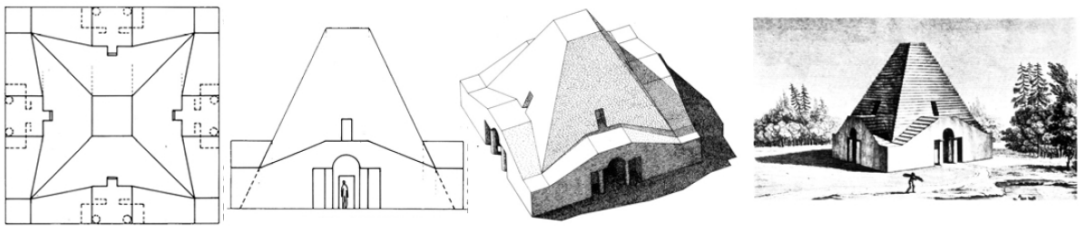


FIGURE 1.41 – Plan, élévation, axonométrie et vue en perspective de la maison des bûcherons de Claude Nicolas Ledoux (Aubert, 1982)

1.3.2 Modélisation architecturale

1.3.2.1 Notions

À la fin du XX^{e} siècle, le modèle est d'abord une maquette. Cet objet réduit peut être soumis à des mesures, des calculs, des tests physiques qui ne peuvent pas être appliqués commodément au sujet de la reproduction (Universalis, 1986). La notion de modèle est également associée à une idée de simplification systématique (Universalis, 1995). Il est ensuite défini par Alain Fuchs comme une représentation d'un objet en volume à une échelle définie. Dans son travail, le modèle sera par contre essentiellement considéré pour la représentation architecturale.

1.3.2.2 Types

Avant d'aborder les types de restitutions virtuelles, nous pouvons citer les travaux de J. Santacana i Mestre et M. Carme Belarte Franco (Santacana i Mestre et Carme Belarte Franco, 2005) qui évoquent d'abord deux modèles de restitution archéologique développés au XIX^{e} siècle :

- *Ruskin représente un point de vue «conservationniste» et préconise la «non-intervention» sur les vestiges*
- *Viollet-le-Duc préconise la reconstruction totale des ruines : «Restaurer un édifice, ce n'est pas l'entretenir, le réparer ou le refaire, c'est le rétablir dans un état complet qui peut n'avoir jamais existé à un moment donné.»*

Ils indiquent ensuite que ces deux tendances ont permis d'aboutir à l'existence de 6 modèles de restitution modernes :

Modèle de restitution	**Définition**	**Exemples**
Restitution du monument sur place	*Reconstituer l'architecture ou les monuments sur les vestiges, en employant les matériaux et les techniques qui ont été attestés sur le site objet de reconstitution, dans le but de donner aux bâtiments un aspect proche de celui qu'ils avaient à l'époque de vie du site reconstituer l'architecture ou les monuments sur les vestiges, en employant les matériaux et les techniques qui ont été attestés sur le site objet de reconstitution, dans le but de donner aux bâtiments un aspect proche de celui qu'ils avaient à l'époque de vie du site*	Pompéi, Herculanum, Martigues (Bouches-du-Rhône) et Augusta Raurica (Suisse)
Restitution de volumes	*Action effectuée sur les vestiges, mais en employant des matériaux nettement différents de ceux qui sont employés sur le site*	Piazza Armerina (Sicile) et thermes de Xanten (Allemagne)
Modèle de transfert	*Déplacement d'un site ou, plus fréquemment, d'une partie du site (un ou plusieurs bâtiments) à un emplacement différent de celui d'origine*	Skansen sur l'île de Djurgården (Stockholm), parc de Kolomenskoe (Moscou) et Laténium (Neuchâtel, Suisse)

Modèle de réplique	*Restitution partielle ou complète d'un site sur un espace séparé -même éloigné- du site, c'est-à-dire sur un espace où il n'y a pas de vestiges archéologiques*	Plymouth (Massachusetts)
Modèle conservationniste	*Intervention minimale sur les vestiges, qui se limite normalement à une consolidation ou à une restauration de ceux-ci*	Consolidation dans la plupart des sites archéologiques en Europe
Modèle virtuel	*Montrer la restitution du site (ou d'une partie du site) sans la matérialiser physiquement, en employant normalement des moyens graphiques*	...

Alain Fuchs définit alors trois types de modèles 3D géométriques à vocation architecturale et basés sur des relevés :

- Tel que saisi : *C'est l'objet tel qu'il existe à l'instant du relevé et sa modélisation la plus fidèle.*
- Tel que construit : *C'est l'objet sans aucune extrapolation et le modèle est utilisé pour masquer l'effet de l'érosion de la pierre et les défauts mineurs dus au temps. Il s'agit de retrouver l'état originel de l'élément relevé.*
- Reconstitution : Les mesures sont complétées par l'expertise du spécialiste du domaine : archéologues, architectes, etc. Ceux-ci valident toutes les hypothèses émises lors de la modélisation pour aboutir à la complétude du modèle.

Toujours dans leur publication (Santacana i Mestre et Carme Belarte Franco, 2005), Mestre et Franco énoncent comme principe fondamental de toute restitution la garantie de la conservation du site ou des vestiges. Ils abordent ensuite plusieurs champs concernés par les démarches de restitution : le domaine scientifique de l'archéologie, l'enseignement, le tourisme et la présentation du patrimoine. Nous n'aborderons ici que le domaine scientifique et la présentation du patrimoine.

1.3.2.3 Production scientifique

Quel que soit son modèle, l'intérêt scientifique de la restitution *permet la vérification des hypothèses de restitution faites autour des bâtiments anciens* (Santacana i Mestre et Carme Belarte Franco, 2005). Pour le *modèle virtuel*, Robert Vergnieux indique en 2011 que dans le cadre scientifique, la démarche de restitution est complexe, pluridisciplinaire et nécessite des années de recherches (Vergnieux, 2011). L'objectif méthodologique des modèles 3D y est de pouvoir soulever toutes les questions de validation que pose le travail de restitution. Contrairement aux modèles 3D pour l'illustration, il s'agit de faire figurer tous les ensembles structurants des constructions qui le composent. Le lecteur de l'image doit aussi être en mesure d'identifier les incertitudes, la ou les phases chronologiques

retenues, la version et les sources documentaires (cf. figure 1.42). Plus récemment, si le respect et la gestion des sources documentaires semblent appliqués (Gosselin, 2014), la manière dont les contraintes, choix et points de vue des restitutions influencent et altèrent le rapport aux données et aux sources pose question (Huggett, 2015).

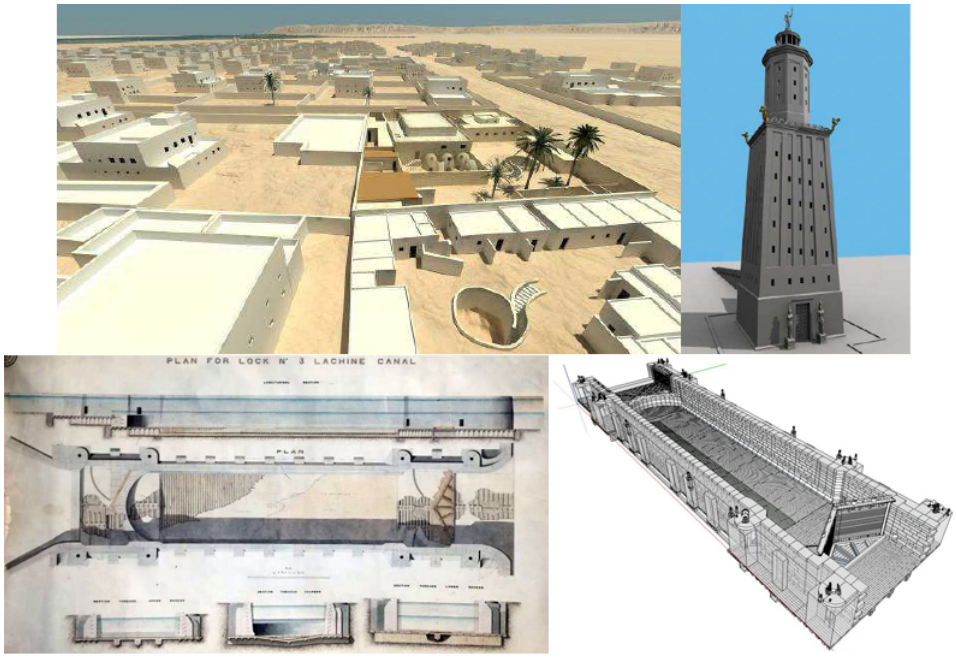


FIGURE 1.42 – Modèles de travail de la ville d'Amarna (version V1/V2) et du phare d'Alexandrie (version V1) (Vergnieux, 2011) (haut) / Plan datant de 1845 et vue en plongé direction Nord-Ouest de la restitution 3D de l'écluse montréalaise Saint-Gabriel (Gosselin, 2014) (bas)

1.3.2.4 Médiation scientifique

Là encore quel que soit son modèle, les intérêts «touristiques» de la restitution sont divers :

- *Elle offre vision plus «complète» et épargne au visiteur de l'effort d'imaginer les parties non conservées.*
- *Elle offre un caractère ludique largement supérieur à celui de la visite d'un site sans restitution.*
- *Elle permet la création d'images nouvelles, qui peuvent être employées en tant que ressource touristique dès l'origine de la visite.*

Robert Vergnieux effectue lui une synthèse des utilisations patrimoniales des restitutions architecturales 3D en archéologie (Vergnieux, 2011). Il explique l'engouement pour celles-ci par l'immédiateté de l'impact visuel qu'elles génèrent et qui facilite grandement la valorisation patrimoniale en alimentant l'imaginaire collectif. Contraintes par des logiques de narration et de ludicité, ces images, dont parfois le photoréalisme peut figer

les informations dans les esprits, peuvent cependant véhiculer des incertitudes, fausses informations (cf. figure 1.43), anachronismes et approximations de détails (cf. figure 1.44). En outre dans ces exemples, aucune mention d'éventuelle étape de validation des volumes et textures, effectuée comme indiqué précédemment par un spécialiste, n'est évoquée et associée clairement.

FIGURE 1.43 – Reconstitutions 3D d'une rue pompéienne sans validation (De Franciscis, 1995) et de la porte royale du château de Versailles dans un XVIII^{e} siècle idéalisé (Bastoen, 2015)

1.3.2.5 Logiciels

Comme pour de nombreux domaines, la variété des logiciels de modélisation et d'animation 3D utilisés en archéologie est importante (Limp *et al.*, 2010). La plupart répondent aux besoins allant de l'intégration de nuages de points issus de numérisations, à l'export en formats aisément intégrables en réalité virtuelle, en passant par la production de rendus photoréalistes par le biais des derniers moteurs. À ce niveau, les choix de ces logiciels sont souvent guidés par les expériences et formations des différents producteurs 3D. Ainsi parce qu'il constitue le principal outil de production des modélisations 3D de cette thèse, nous citerons Autodesk 3ds Max (Gholipour *et al.*, 2007) associé avec le moteur de rendu V-Ray (Gabellone *et al.*, 2013).

1.4 Constatations générales

À l'amorce de cette thèse, la numérisation 3D de sites, notamment mal conservés, difficiles d'accès ou dangereux, devient abordable technologiquement et financièrement grâce à la photogrammétrie, qui permet une restitution 3D de la réalité assez fidèle. Les scanners 3D peuvent aussi fournir des nuages de points extrêmement précis, mais le coût du matériel et l'acquisition des compétences nécessaires pour la manipulation de ces nuages constituent souvent un frein à leur utilisation.

FIGURE 1.44 – 1 : Drapeau turc du XIX^{e} siècle dans le jeu vidéo *Assassin's Creed* (1191) (Blup, 2008) / 2 : Bureau de tabac du XX^{e} siècle dans le jeu vidéo *Assassin's Creed Unity* (Révolution française) (Le Corre, 2014) / Rose de la façade ouest de Notre-Dame de Paris sur le monument existant (3), dans *Paris 3D Saga* (4) (Dassault, 2013) et dans le jeu vidéo *Assassin's Creed Unity* (5) (Merlot, 2015)

Parallèlement, les besoins de la communauté archéologique concernant les restitutions 3D sont considérables, mais celles-ci sont fréquemment effectuées par des chercheurs férus de techniques de modélisation 3D, de surcroît en perpétuelle évolution, ou par des prestataires onéreux, sans qu'il subsiste un partage de compétences efficace et efficient. D'autre part, ces données produites par numérisation ou modélisation constituent une étape préliminaire indispensable pour la simulation et la réalité virtuelle appliquées à l'archéologie, décrites dans le chapitre qui suit.

Chapitre 2

État de l'art : Simulation visuelle hors ligne et réalité virtuelle en archéologie

Dans son article (Zyda, 2005), M. Zyda trace une route menant de la simulation visuelle aux *serious games* en passant par la réalité virtuelle. En s'inspirant de cette démarche, l'objectif de ce chapitre est de résumer quelques travaux concernant ces domaines appliqués au patrimoine culturel et à l'archéologie, afin d'en dégager des tendances. Dans un premier temps, nous tenterons de parcourir différentes applications de la simulation visuelle précalculée (section 2.1) puis nous aborderons les usages de la réalité virtuelle en archéologie (section 2.2). L'ordre des sous-sections de ce chapitre est détaillé dans la figure 2.1.

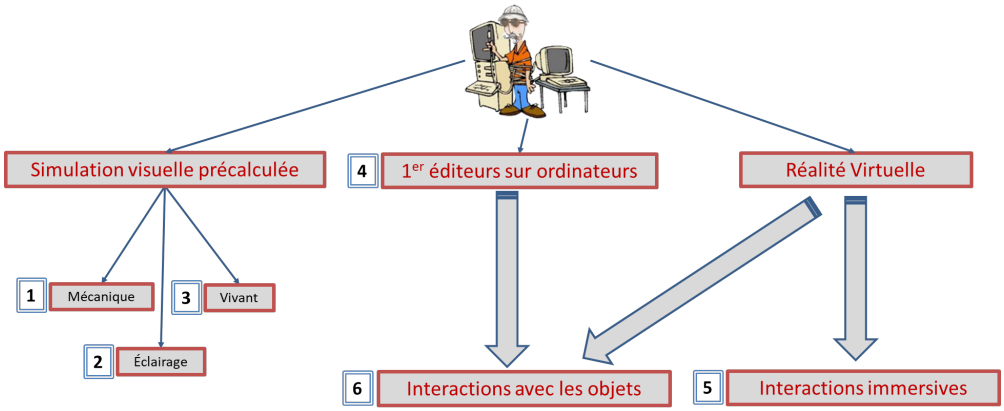


FIGURE 2.1 – Organisation schématique des thématiques développées dans le chapitre 2 "État de l'art : Simulation visuelle hors ligne et réalité virtuelle en archéologie"

2.1 Simulation visuelle précalculée

En 1996, J. K. Caird définit la simulation visuelle comme une *image 3d générée par ordinateur pour créer une interaction cognitive et physique* (Caird, 1996). T. Ören souligne cependant en 2011 de nombreuses ambiguïtés autour des définitions des différentes simulations en listant 400 types. Il associe notamment la simulation visuelle au monde du jeu vidéo (Ören, 2011).

Pour ce qui est de l'archéologie, de nombreux travaux utilisent le terme de simulation. La plupart du temps, celle-ci est purement visuelle, précalculée et non interactive. D'un point de vue général, elle correspond assez bien à celle définie dans le dictionnaire Larousse qui évoque une *représentation du comportement d'un processus physique, industriel, biologique, économique, ou militaire au moyen d'un modèle informatique dont les paramètres et les variables sont les images de ceux du processus étudié* (Larousse, 2016).

En archéologie, le modèle sur lequel repose cette simulation visuelle est majoritairement le modèle 3d de bâti et/ou d'objet décrit dans le chapitre précédent. Concernant les besoins de l'archéologue, R. Vergnieux évoque *la simulation des mouvements* comme faisant partie intégrante du processus de restitution, car permettant de valider (ou non) les *possibilités physiques* et *faisabilités techniques* (Vergnieux, 2011). Maurizio Forte préconise à la même époque l'utilisation du terme "simulation" à la place de "reconstruction" d'un passé désormais codé par processus (Forte, 2011).

Toujours sans prétendre établir une classification des simulations numériques en archéologie, nous avons pu dégager quelques tendances issues d'une collecte des principaux cas d'utilisation. Nous aborderons ainsi des aspects mécaniques (sous-section 2.1.1), l'éclairage (sous-section 2.1.2), la géologie, l'hydrologie (sous-section 2.1.3) et le vivant (sous-section 2.1.4) (sous-section 2.1.5).

2.1.1 Simulation mécanique

Communément utilisée en milieu industriel, la simulation mécanique a pris place assez naturellement en archéologie. La mécanique est en effet utilisée depuis de nombreuses années pour mieux comprendre les fonctions des artefacts et réalisations technologiques préindustrielles (Cotterell et Kamminga, 1992).

2.1.1.1 Schématiques

Les possibilités de créations, agencements et animations de primitives 3D par des logiciels de conception 3D grand public ont permis dès 2006 de proposer une simulation d'une hypothèse (à notre connaissance non confirmée) de construction de Stonehenge (cf. figure 2.3). Ensuite, la présence d'un schéma de la scierie de Hiérapolis gravé dans la pierre a motivé en 2010 une simulation schématique (Grewe, 2010) (cf. figure 2.2). Cette scierie d'Hiérapolis (Asie Mineure) consistait en un moulin à eau romain. Datant du III^{e} siècle, c'est la plus ancienne machine connue utilisant un système bielle-manivelle. Dans la même veine, R. Vergnieux propose en 2011 une simulation du mécanisme d'une

machine hydraulique romaine (Vergnieux, 2011). Plus récemment, un exemple de simulation 3D du système de levage de bateau d'Archimède a été développé dans le cadre d'un cours d'Histoire de l'ingénierie ancienne (Tan et Tan, 2015a) (cf. figure 2.3). Ces modèles CAO sont aussi aujourd'hui utilisés pour des simulations de mécanique des fluides numérique (Castro-Garcia *et al.*, 2015) et de résistance aux phénomènes naturels (Lignola *et al.*, 2014) (cf. figure 2.4).

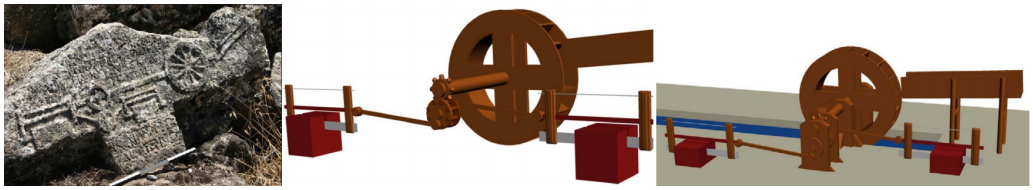


FIGURE 2.2 – Représentation sur un sarcophage en pierre et simulation de la scierie de pierre romaine de Hiérapolis (IIIe après J.-C) (Grewe, 2010)

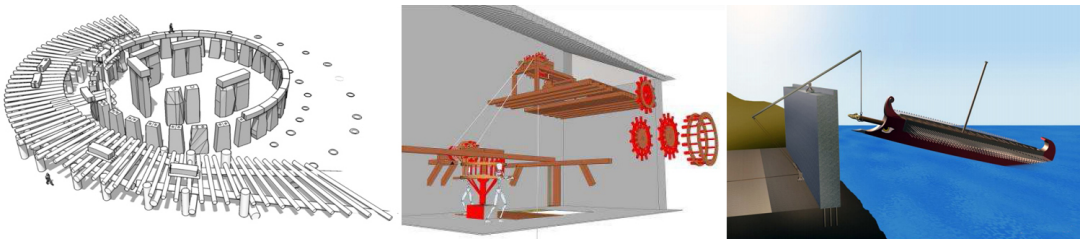


FIGURE 2.3 – Simulation d'une hypothèse de construction de Stonehenge (Talboys, 2010), modèle de travail sur le mécanisme d'une machine hydraulique romaine (Vergnieux, 2011) et système de levage d'Archimède (Tan et Tan, 2015a)

2.1.1.2 Photoréalistes

Au début des années 2000, apparaissent dans les actes du colloque *Virtual Retrospect* des représentations à vocation réaliste de processus physiques comme le levage de l'obélisque du Circus Maximus, le déroulement de toiles au-dessus du Colisée ou encore le fonctionnement d'un treuil de la flotte impériale (Lecocq, 2003) (cf. figure 2.5). L'utilité du souci de réalisme peut cependant être débattue. M. Roussou indique que les voies photoréalistes et non photoréalistes doivent être utilisées pour l'une dans un cadre de médiation scientifique et pour l'autre, dans un cadre de recherche scientifique (Roussou et Drettakis, 2003). Laia Pujol-Tost sépare le réalisme figuratif du réalisme fonctionnel, dont la mission est de fournir des connaissances sur les propriétés des objets et de leurs relations (Pujol-Tost, 2011). Malgré la qualité des rendus architecturaux actuels (Faraday3d, 2017) tentant de franchir l'uncanny valley (Mori, 1970), le cerveau humain reste tout à fait capable de les distinguer des photographies du monde réel. Quoi qu'il en soit, de récents travaux autour de la restitution d'un chemin en planches chinois tentent de

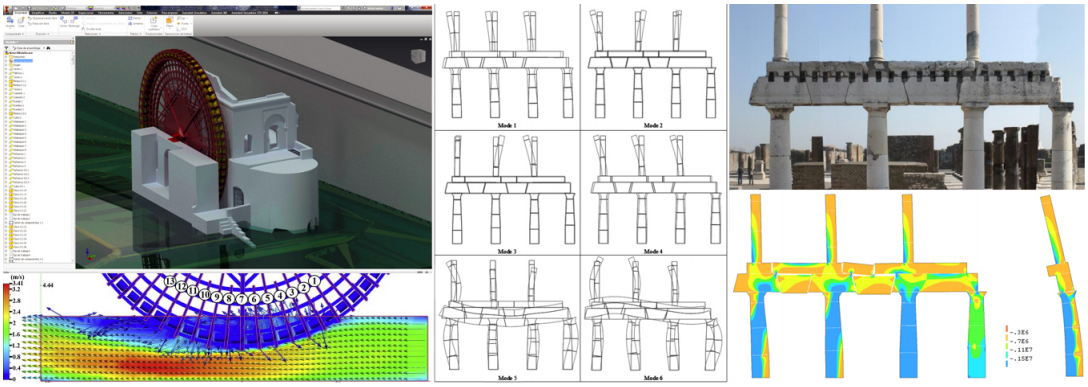


FIGURE 2.4 – Gauche : Modèle CAO du moulin romain de la Albolafia (Espagne) et simulation de la dynamique d'écoulement de l'eau (Castro-Garcia *et al.*, 2015) / Droite : Simulation d'impacts du tremblement de terre sur un portion de colonnade du Forum de Pompeii et cartes de répartition d'efforts de traction (Lignola *et al.*, 2014)

mêler les deux approches en conservant une légitimité scientifique (Chen *et al.*, 2016) (cf. figure 2.6).

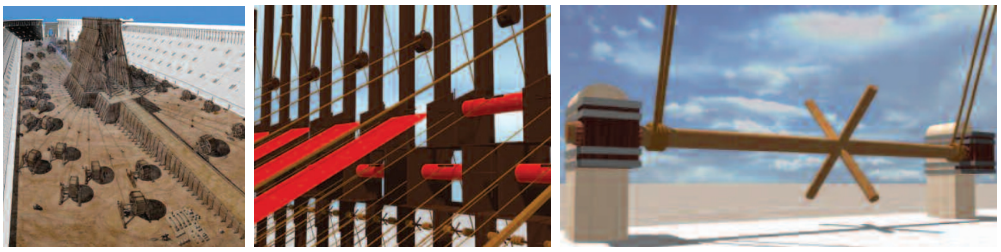


FIGURE 2.5 – Gauche : Rampe, portique et machines de levage de l'obélisque du Circus Maximus (aquarelle et modélisation) / Milieu : Hypothèse de déroulement de toiles en quinconce au-dessus du Colisée / Droite : Reconstitution d'un système de treuil manœuvré par les marins d'une flotte impériale (Lecocq, 2003)

2.1.1.3 Objets

À une échelle plus petite, des simulations de fonctionnement d'objets archéologiques ont été réalisées en 2009 dans le cadre de fouilles préventives. Il s'agissait d'expliquer deux types de débitage Levallois de silex (à éclat préférentiel et à pointe) puis le mécanisme d'un pieu serrure (Raymond et Sauliere, 2009) (cf. figure 2.7). Il existe aujourd'hui une multiplicité d'objets archéologiques 3D sur internet (CGTrader, 2017) et quelques évocations scientifiques de simulations d'utilisation d'objets, plutôt dans un but pédagogique (Tan et Tan, 2015a) (cf. figure 2.7).

Des armes et engins de siège ont également fait l'objet de simulations (Paipetis et Ceccarelli, 2010) (Kayumov et Minchev, 2013) (cf. figure 2.8). Ces simulations d'objets

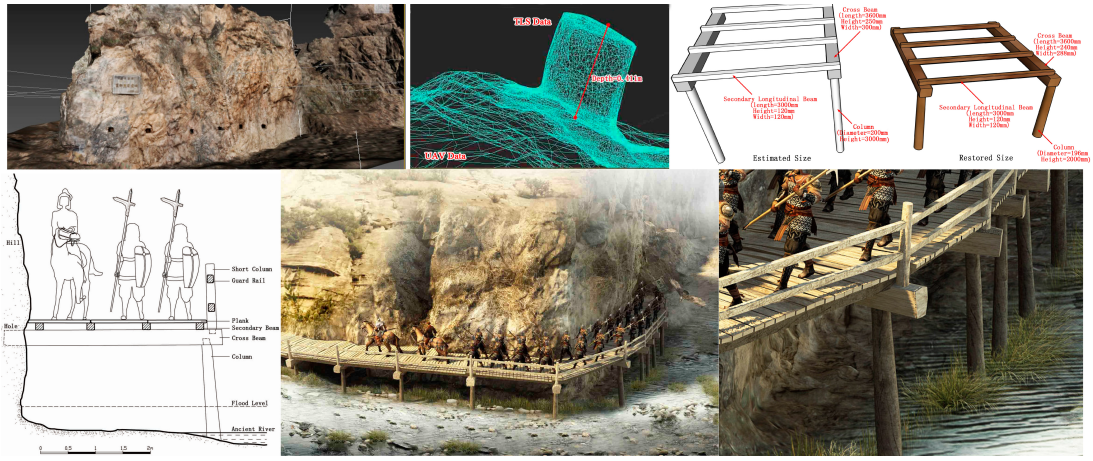


FIGURE 2.6 – Numérisation de l'actuel chemin en planches Chiya (Wangjialeng, Chine), estimation de la profondeur de trou, portion et coupe schématiques restituées, restitutions photoréalistes prenant en compte les simulations mécaniques (Chen *et al.*, 2016)

militaires permettent notamment de répondre à des questions concernant la répartition des forces, les matériaux utilisés ainsi que l'obsolescence des armes. Elles sont désormais intégrées dans des simulations de siège temps réel (Forlani *et al.*, 2016).

2.1.1.4 Ossatures et ornements

Il existe des cas où la restitution de construction ne peut s'appuyer sur des exemples existants ou sur une quelconque documentation écrite. Au début du XIII^{e} siècle, les Thulés (ancêtres des Inuits canadiens actuels) quittent le détroit de Bering pour une migration à travers l'Arctique canadien, région en grande partie dépourvue de bois flotté. Ils utilisent alors des os de baleine pour construire les charpentes de leurs maisons. En 2006, une simulation d'équilibre du faîtage d'une maison Thulé est effectuée afin de restituer au mieux ce type d'habitat (Levy et Dawson, 2006). Il est aussi intéressant de relever que la décomposition de l'ossature d'un édifice complexe, à des fins pédagogiques, permet la simulation de sa construction (Tan *et al.*, 2015) (cf. figure 2.9).

Pour ce qui est des ornements, des restitutions de constructions de l'ancien site maya de Xkipché ont été réalisées à partir de grammaires de formes architecturales (Müller *et al.*, 2006) (cf. figure 2.10). Par analogie, cette étude de typologie décorative n'est pas sans rappeler celle effectuée autour du codage de thèmes décoratifs de céramiques méridionales au Néolithique final-chalcolithique (Giligny *et al.*, 1997). La simulation concerne le comportement des architectes de l'époque travaillant à partir de règles. Celles-ci ont été décrites par des archéologues à partir d'une vingtaine de vestiges présents uniquement sur le site.

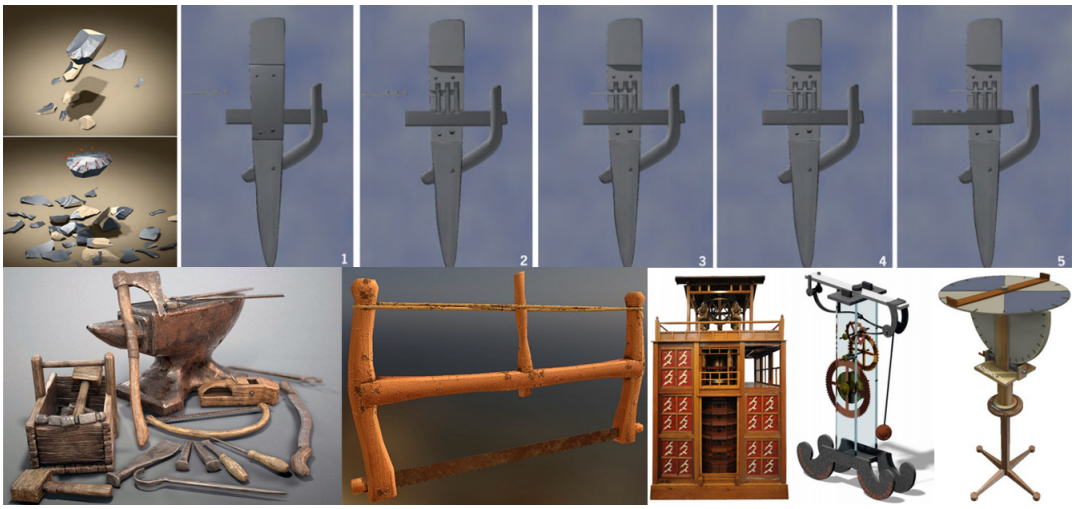


FIGURE 2.7 – Débitage Levallois à pointe et à éclat préférentiel, mécanisme de pieu-serrure (Chelles) (Raymond et Sauliere, 2009), outils artisanaux médiévaux issus d'une plateforme de distribution de modèles 3d en ligne (CGTrader, 2017), horloges de Su Song (réduite), de Galilée et dioptre de Héron d'Alexandrie (Tan et Tan, 2015a)

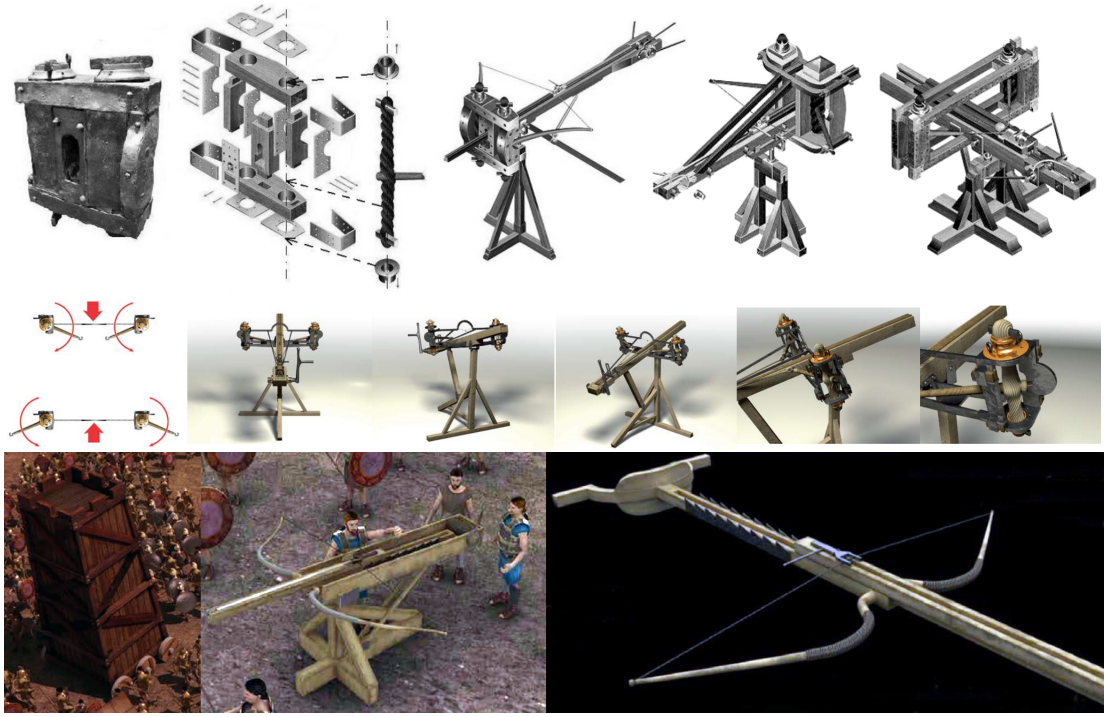


FIGURE 2.8 – Moteur à torsion d'une arme de jet, catapulte et balistes (Paipetis et Ceccarelli, 2010) (Kayumov et Minchev, 2013), beffroi, oxybèle et gastrophète (Forlani *et al.*, 2016)

FIGURE 2.9 – Haut : Squelette de baleine, sa numérisation et la simulation d'équilibre du faîtage d'une maison Thulé en os de baleine (Levy et Dawson, 2006) / Bas : Installation, raccordement des poutres périmétriques (Pingban Fang) et assemblage d'un Shang Ang Puzuo (type dougong) au sein d'un modèle 3D de temple chinois (Tan *et al.*, 2015)

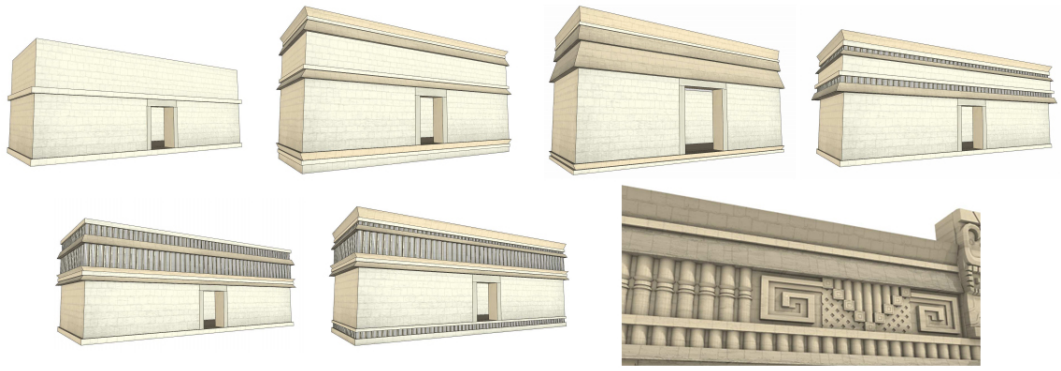


FIGURE 2.10 – Simulations procédurales de constructions Puuc à Xkipché (Yucatán - Mexique) à partir de grammaires de formes architecturales (Müller *et al.*, 2006).

2.1.1.5 Industrie

Les fabriques, forges, usines et leurs machines et outils impliquent des simulations physiques hautement complexes, et ce même en cas de "faible" capacité de production. Cependant étant de tout temps au cœur des sociétés, de nombreuses questions liées aux industries, notamment quantitatives, intéressent les archéologues. S. Benoit (Benoit *et al.*, 2010) questionne directement ainsi l'utilisation de la simulation pour la compréhension de l'histoire industrielle. Plus récemment, une simulation de grue (Tan et Tan, 2015b) implique la question des outils de construction et la reconstitution simplifiée d'une machine à distiller (Lorenzini *et al.*, 2013), d'après un manuscrit d'époque, laisse supposer des problématiques thermodynamiques à considérer (cf. figure 2.11). Il est important de signaler à ce stade que l'on parle d'activités humaines qualifiées d'industrielles dès la préhistoire.

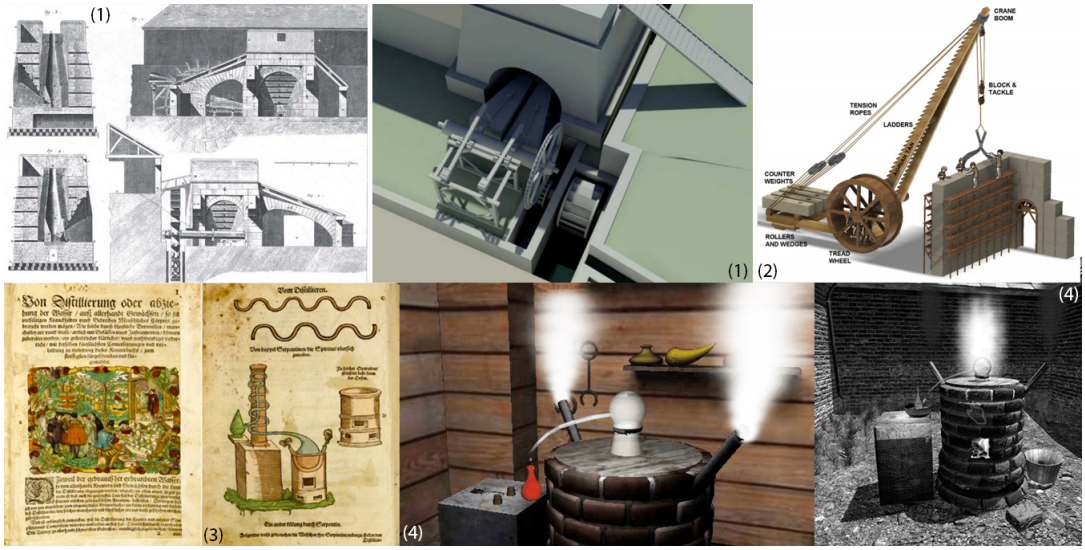


FIGURE 2.11 – 1 : Dessin et restitution du haut-fourneau de Marcenay (Côte-d'Or) (Benoit *et al.*, 2010) / 2 : Grue antique (Tan et Tan, 2015b) / Traité de distillation médicinale du XVI^{e} siècle (3) (Carrozzino *et al.*, 2013) et simulations temps réel et interactives d'une machine restituée (4) (Lorenzini *et al.*, 2013) (Champion, 2016)

2.1.2 Simulation d'éclairages

La simulation d'éclairage permet de visualiser la façon dont les habitations et bâtiments étaient éclairés et donc la manière dont les habitants pouvaient percevoir ces lieux dans lesquels ils évoluaient quotidiennement. L'étude de la composition (Keira De Rosa, 2014), du fonctionnement et des utilisations de dispositifs d'éclairages constitue un champ scientifique qui "éclaire" en outre sur les choix architecturaux et symboliques des bâtisseurs du passé (Rueff, 2016).

2.1.2.1 Lecture de l'environnement intérieur

Les décors muraux et leur lecture ont une réelle importance en archéologie. Parallèlement, de nombreuses simulations montrent le site archéologique dans des conditions d'éclairage moderne inappropriées. Les dispositifs d'éclairage d'époques permettaient en effet de mettre en valeur certaines parties et d'en masquer d'autres. Les exemples de simulation avec des hiéroglyphes (Sundstedt *et al.*, 2004) ou des peintures (Devlin *et al.*, 2002) sont assez évocateurs (cf. figure 2.12).

FIGURE 2.12 – Hiéroglyphes du temple de Kalabsha éclairés par un éclairage moderne et une lampe à l'huile (de sésame) (Sundstedt *et al.*, 2004) / Maison des Vettii (Pompéi) éclairage moderne et à lampe à huile (d'olive) (Devlin *et al.*, 2002)

Dans l'abri 3D de Cap Blanc (Dordogne - 15 000 ans BP), une simulation d'éclairage d'une part à ampoule à incandescence et d'autre part à lampe à graisse a été réalisée (cf. figure 2.13). Les ombres créées par la flamme en mouvement semblent donner le mouvement du cheval. Les archéologues se demandent ainsi si les pattes étaient délibérément non sculptées en détail, et ce afin d'accentuer le mouvement par la création d'une certaine forme de flou (Devlin *et al.*, 2002).

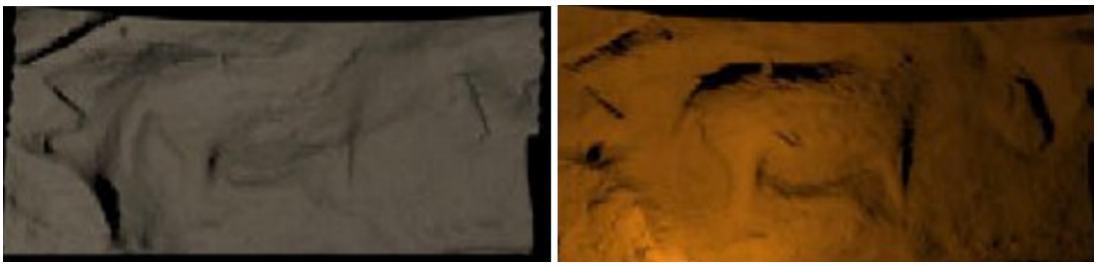


FIGURE 2.13 – Simulations d'éclairage sur le cheval de l'abri de Cap Blanc (Devlin *et al.*, 2002)

2.1.2.2 Prédiction de techniques d'éclairage

Parallèlement, la simulation permet aussi la prédiction des techniques d'éclairage et améliore ainsi l'interprétation archéologique. Dans une maison médiévale, les archéologues ont constaté que seule la moitié supérieure de quelques cruches est émaillée et

décorée. Une simulation de la maison avec meubles et objets a permis de vérifier la position des éclairages (Devlin *et al.*, 2002) (cf. figure 2.14).

FIGURE 2.14 – Simulation d'éclairages dans une maison médiévale (Devlin *et al.*, 2002)

Au Japon en 2006, les archéologues s'interrogent pour savoir si les peintures et sculptures de la grotte Fugoppe ont été réalisées à lumière naturelle ou artificielle. Le peu de suie sur les parois met en doute l'hypothèse d'utilisation de torches. Une simulation de lumière naturelle diffusée au travers d'une numérisation de la grotte a permis de valider la faisabilité de réalisation à lumière naturelle, et ce à différentes heures de la journée (Masuda *et al.*, 2006). Une démarche similaire concernant les positions d'éclairages artificiels a été réalisée dans la grotte espagnole d'Ardales (Hoffmeister, 2016) (cf. figure 2.15).

2.1.2.3 Lecture de l'environnement extérieur

Comme pour les intérieurs, l'étude de l'influence de l'éclairage solaire a son importance en archéologie. R. Vergnieux met en valeur cette influence sur le Circus Maximus (cf. figure 2.16). Cet édifice public pouvait accueillir environ 250 000 spectateurs et ceux-ci devaient pouvoir observer les spectacles dans les meilleures conditions. La position et l'orientation de l'édifice semblent avoir été décidées en fonction de ce paramètre d'éclairage (Vergnieux, 2011). Plus généralement, l'archéoastronomie semble s'être désormais bien emparée des simulations 3D (Zotti, 2016).

2.1.3 Simulations géologiques et hydrologiques

L'importance de la nature des sols et des zones humides est considérable pour l'archéologue. Elle impacte à la fois sa fouille, mais aussi ses raisonnements concernant le

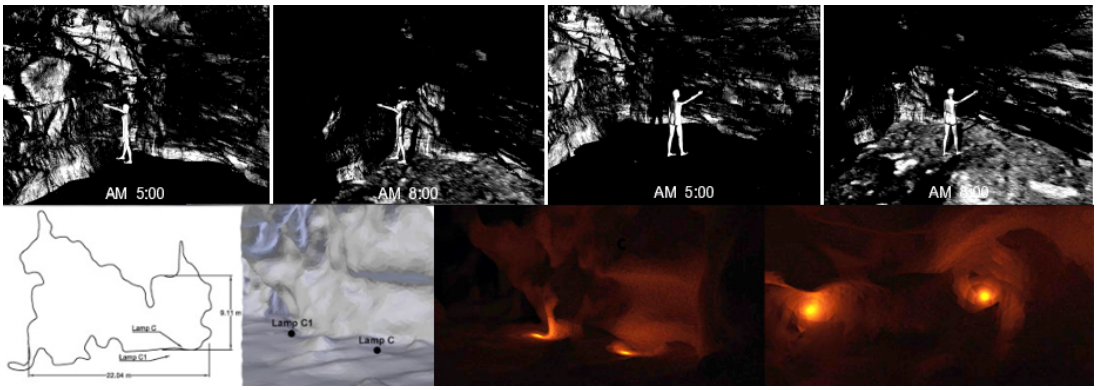


FIGURE 2.15 – Résultat de la simulation d'éclairage dans la grotte Fugoppe (à lumière naturelle au solstice d'été) (Masuda *et al.*, 2006) et dans la grotte espagnole d'Ardales (lampe à suif) (Hoffmeister, 2016)

FIGURE 2.16 – Étude d'éclairage solaire dans le Circus Maximus de Rome au IV^{e} siècle (Vergnieux, 2011) et de l'alignement du soleil au solstice d'été avec l'entrée d'un site néolithique (Zotti, 2016)

lien entre les hommes du passé et leur milieu. Même s'ils sont fortement hétérogènes, nous allons tout de même tenter d'évoquer quelques travaux autour de simulations géologiques et hydrologiques.

2.1.3.1 Stratigraphie

La stratigraphie, parfois nommée géologie historique, est une branche pluridisciplinaire étudiant l'agencement des différentes couches géologiques afin d'en tirer des informations temporelles. Elle fait ainsi partie intégrante des archéosciences.

En 1991, Paul Reilly simule les couches stratigraphiques d'un site archéologique nommé *Grafland* à l'aide du modeleur IBM WINSOM (Flicketts *et al.*, 1989) dans lequel des artefacts de couches antérieures sont distribués dans des couches plus récentes (Reilly, 1991) (cf. figure 2.17). Le résultat est présenté dans un petit film d'animation (Reilly, 1990) ayant pour but de prouver que les archéologues peuvent produire des représentations réalistes des données qu'ils détruisent inévitablement au cours de la fouille.

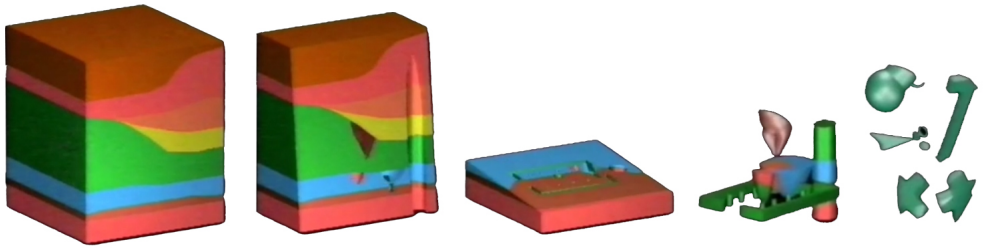


FIGURE 2.17 – Simulation de couches stratigraphiques et d'artefact du site archéologique imaginaire *Grafland* (Reilly, 1991)

Des besoins liés à la simulation de l'agencement d'unités de fouille (ou stratigraphiques), et ce en termes d'analyse spatiale, sont ensuite évoqués par N. Rageul dans sa thèse en 2007. Il s'intéresse aux *distances entre deux unités de fouille* et plus généralement aux positions, superficies et volumes de celles *ayant une couleur, une consistance et une granulométrie particulière* (Rageul, 2007) (cf. figure 2.18).

Il existe également d'autres réflexions autour de simulations stratigraphiques. En Russie, V. Kochnev évoque la recherche de susceptibilités magnétiques dans le sous-sol du site archéologique Arkaïm (Kochnev *et al.*, 2004). En 2008, U. Lieberwirth cherche à simuler en 3D les relations entre les unités stratigraphiques du site *Akroterion* à Cythère (Lieberwirth, 2008). Plus récemment, l'assemblage de diverses sources de données 3D, toujours autour de la grotte espagnole d'Ardales, alimente le lot des représentations de simulations stratigraphiques (Hoffmeister *et al.*, 2014) (cf. figure 2.19).

2.1.3.2 Processus hydrologiques

Quelques simulations d'inondations et crues ont été appliquées à des sites archéologiques. Une inondation sur une reconstitution de zone inondable à l'âge du fer permet

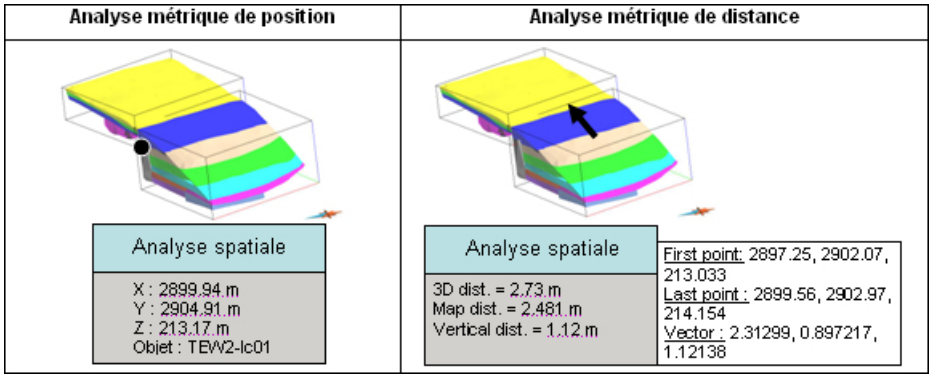


FIGURE 2.18 – Analyses spatiales métriques 3D appliquées à l'archéologie (Rageul, 2007)

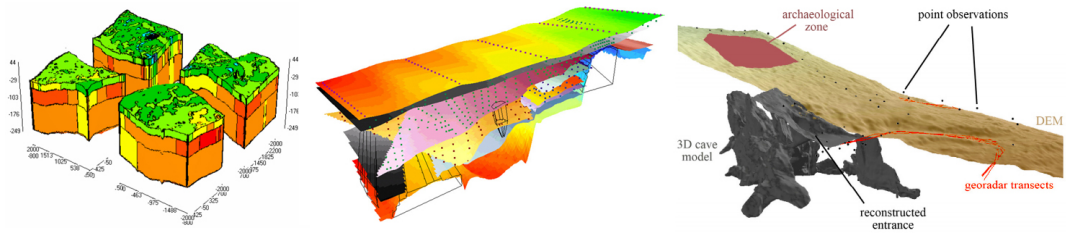


FIGURE 2.19 – Simulation 3D de la susceptibilité magnétique du sous-sol du site archéologique Arkaïm (Russie) (Kochnev *et al.*, 2004), relations entre particularités géologiques du site Akroterion à Cythère (Lieberwirth, 2008) et assemblage de plusieurs sources de données 3D autour de la grotte espagnole d'Ardales (Hoffmeister *et al.*, 2014)

de valider ou non les dispositions des habitations et cultures (Corinth, 2011) (cf. figure 2.20). La reconstitution d'une crue à l'époque contemporaine permet également d'étudier les logiques de préservation de l'existant de la tour de Clifford (York) (Challis, 2010) (cf. figure 2.20).

FIGURE 2.20 – Simulation d'inondation d'une maison à l'âge du fer (Corinth, 2011) / Crue autour de la tour de Clifford (York) en 2002 (Challis, 2010)

Q. Clevis indique en 2006 que les processus fluviaux peuvent masquer, exposer, éroder et détruire des parties d'enregistrement archéologiques. Leur fragmentation s'effectue en trois dimensions, en particulier lorsque le système fluvial a été soumis à plusieurs phases d'altération. Un modèle de simulation est présenté afin de mieux comprendre cette décomposition dans le sous-sol et de pouvoir retrouver des éléments archéologiques (Clevis *et al.*, 2006). Parallèlement autour d'un abri sous roche du canyon de la Segura (fleuve espagnol), les caractéristiques des vestiges culturels conservés par des dépôts d'inondation et la simulation 3D de ces phénomènes fluviaux ont permis de révéler de longues périodes d'occupation humaine du site, ainsi qu'un passage par le canyon durant des périodes d'écoulement fluvial à faible débit (Garcia-Garcia *et al.*, 2013) (cf. figure 2.21).

2.1.4 Simulations végétales

L'étude du paléoenvironnement est une discipline pluridisciplinaire largement pratiquée et depuis de nombreuses années. Pourtant, les travaux concernant les simulations visuelles de végétations du passé ne semblent pas être très nombreux. Nous pouvons cependant évoquer le fait que l'émergence des simulations 3D de végétaux (Prusinkiewicz *et al.*, 1995) amène son lot de réflexions autour des changements de paysages archéologiques. Là encore et peut-être parce que l'on touche au vivant, il existe des travaux traitant de la perception des imperfections liée à l'uncanny valley (Pihel *et al.*, 2014).

À partir de données issues d'un SIG, Catacchio et Cardosa reconstruisent en 2001 le paysage entourant le site archéologique étrusque *Area Archeologica di Sovana* à l'Âge

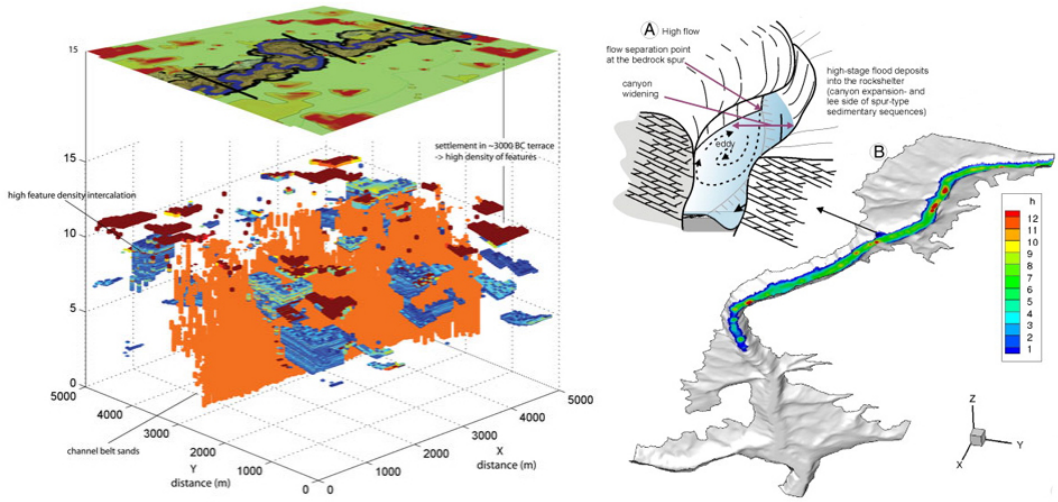


FIGURE 2.21 – Répartition d'éléments archéologique dans une plaine inondable (Clevis *et al.*, 2006) et dépôts d'eau douce autour d'un abri sous roche du canyon de la Segura (fleuve espagnol) durant des paléo-inondations occasionnelles (Garcia-Garcia *et al.*, 2013)

du Bronze, et ce à partir d'études paléoenvironnementales dont les résultats sont habituellement présentés sous forme de tableaux ou graphiques (cf. figure 2.22).

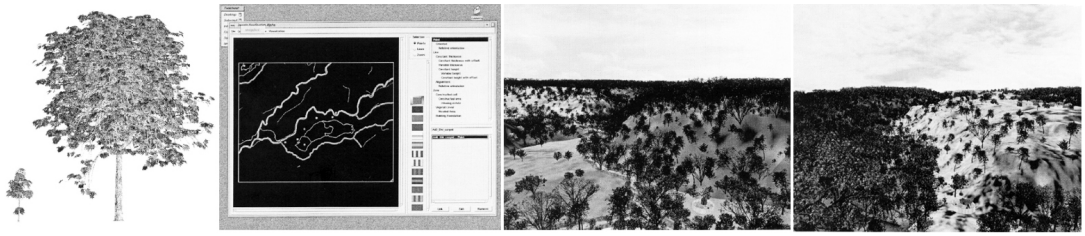


FIGURE 2.22 – Arbre 3D réalisé grâce au logiciel AMAP (De Reffye et Blaise, 1998), interface du SIG, reconstitution du site archéologique étrusque *Area Archeologica di Sovana* à l'Âge du Bronze ancien et final (Negroni Catacchio et Cardosa, 2002)

En 2006, BR. Gearey propose ainsi une simulation de l'évolution de l'Aulne sur le site de l'âge du fer *Sutton Common* (Angleterre) à partir de reconstructions de zones d'eaux profondes et stagnantes (Gearey et Chapman, 2006) (cf. figure 2.23). Au même moment, E. Ch'ng simule l'évolution d'un paysage du Mésolithique d'une région autour de la mer du Nord selon des changements saisonniers et écologiques (Ch'ng et Stone, 2006) (cf. figure 2.23).

Récemment, une recherche détaillée de données polliniques issues de 125 sites de la Twente (région orientale des Pays-Bas) a permis la création de cartes de végétation très précises sur plusieurs périodes et ainsi de restitutions paysagères abouties (van Beek *et al.*, 2015) (cf. figure 2.24).

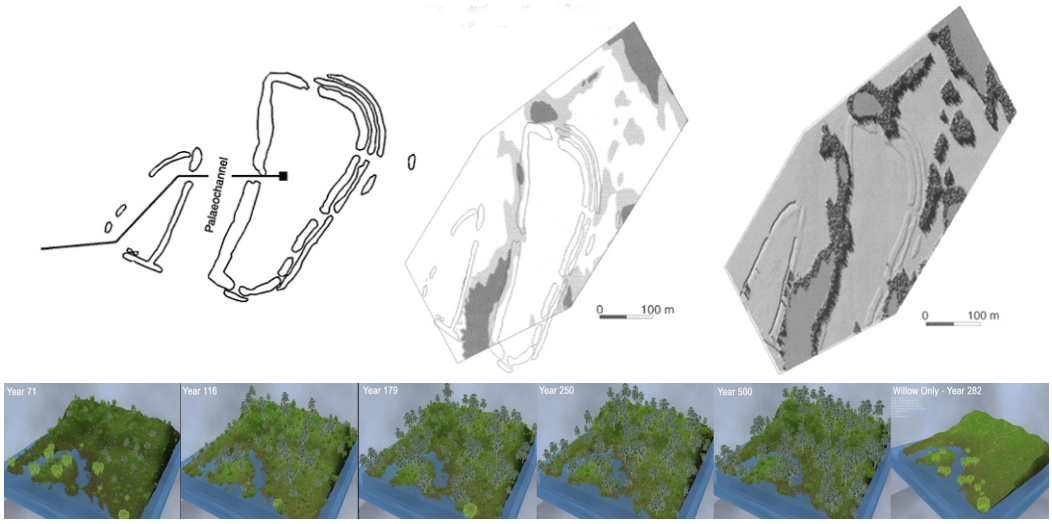


FIGURE 2.23 – Évolution de l'Aulne sur le site de l'Âge du fer *Sutton Common* (Gearey et Chapman, 2006) / évolution d'un paysage du Mésolithique selon des changements saisonniers et écologiques (Ch'ng et Stone, 2006)

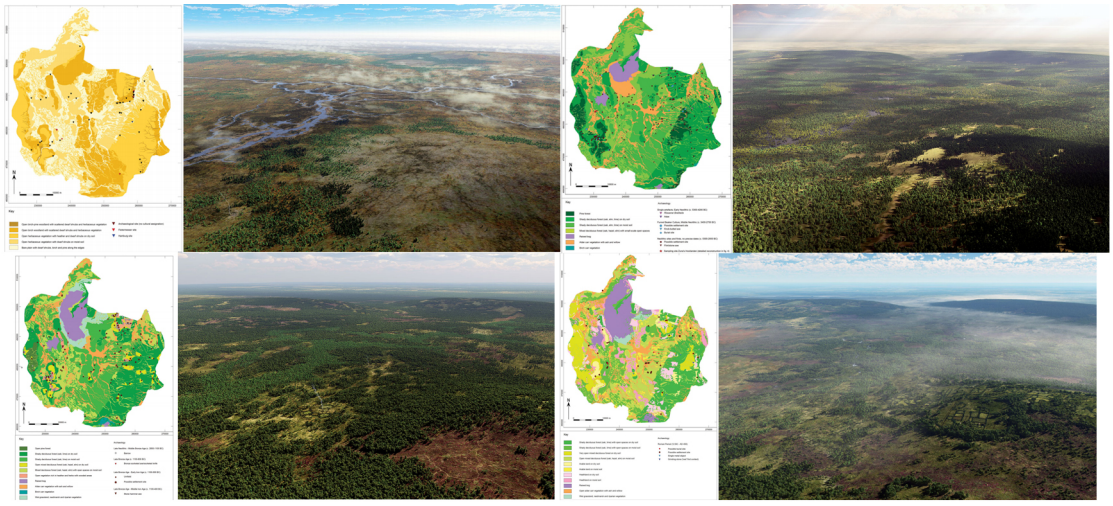


FIGURE 2.24 – Cartes de végétation et rendus 3D de la Twente (région orientale des Pays-Bas) au nouveau Dryas (-10000), Atlantique (-4000), Subboréal (-1500) et au Subatlantique (200) (van Beek *et al.*, 2015)

2.1.5 Simulation d'humains virtuels

L'humain virtuel constitue naturellement la clé de voûte de l'utilisation des simulations numériques dans le cadre des sciences humaines. D'après la lecture des différentes exploitations de simulations d'humains virtuels pour l'archéologie, il nous est apparu deux catégories d'usages. D'un côté, l'objet d'étude est en effet la mise en scène d'activités de quelques individus et, de l'autre, il s'agit d'observer les comportements de foules du passé. Les problématiques de rendus d'humains virtuels, à la base de la théorie de l'uncanny valley, sont aussi évoquées dans le milieu de l'archéologie virtuelle (Vosinakis et Avradinis, 2015).

2.1.5.1 Mises en scène

Plusieurs utilisations de simulations d'humains virtuels en archéologie ont été utilisées dans le cadre de reconstitutions de scènes du passé. En 2002 le projet *LIFEPLUS* avait pour objectif la restitution de scènes pompéiennes illustrées sur d'anciennes fresques par le biais de techniques de réalité virtuelle, mixte, en temps réel ou non (Magnenat-Thalmann *et al.*, 2002). Des personnages aux comportements dramaturgiques peuplaient des scènes de la vie quotidienne (cf. figure 2.25).

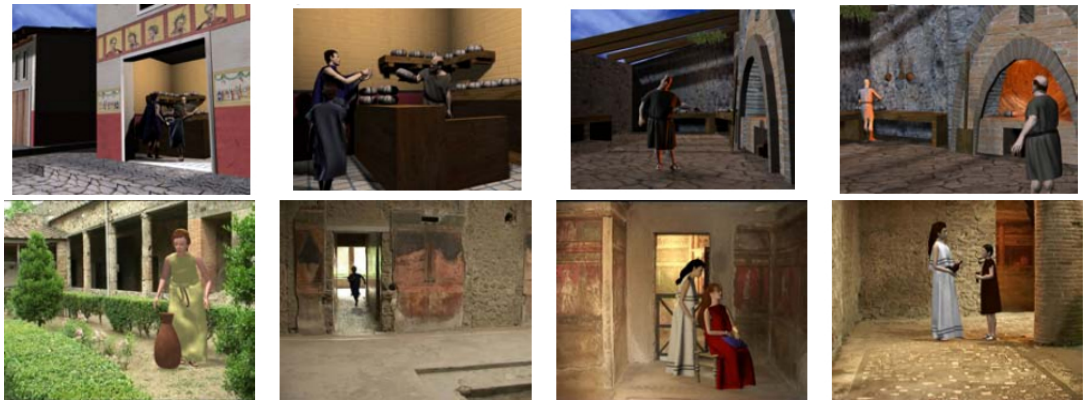


FIGURE 2.25 – Simulations de scènes pompéiennes dans une boulangerie en temps réel, non réel et de résidences en réalité mixte. (Magnenat-Thalmann *et al.*, 2002)

D'autres travaux ont suivi, touchant au cérémoniel (Lecocq, 2003), à l'industriel (Benoit *et al.*, 2010) et ayant des finalités plutôt pédagogiques et médiatiques (cf. figure 2.26). Les dernières facilités d'intégration et d'animation d'humains virtuels impliquent une plus grande création et diffusion d'images aux grandes qualités esthétiques, mais parfois non sourcées ni documentées (Kriek et Haars, 2016) (cf. figure 2.27).

2.1.5.2 Foules

Au-delà des scènes, il existe en archéologie de nombreux exemples de simulation de foule d'agents. Il s'agit d'utiliser les multiples travaux issus de la recherche en informatique (Helbing et Molnar, 1995) (Reynolds, 1999) (Rodriguez *et al.*, 2010) (etc.) afin de

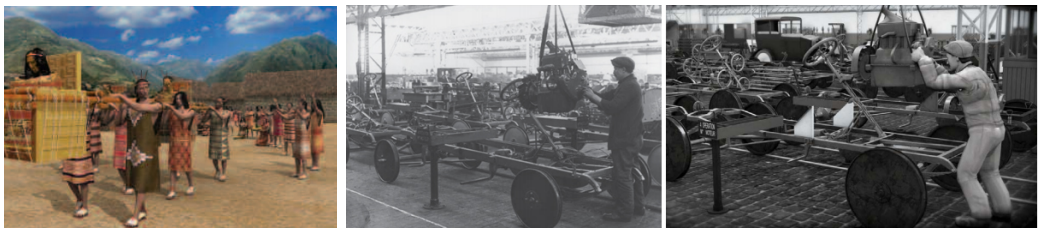


FIGURE 2.26 – Reconstitution d'une cérémonie funéraire inca (Lecocq, 2003) / photographie et reconstitution virtuelle d'un poste d'opération chez Renault (Benoit *et al.*, 2010).

FIGURE 2.27 – Rendus de simulations de scènes non sourcées ni documentées (Kriek et Haars, 2016)

modéliser les individus comme des particules qui interagissent avec leur environnement par le biais d'un ensemble de forces appliquées.

En 2005, des piétons virtuels autonomes peuplent la restitution de la gare originelle *Pennsylvania Station* de New York (Shao et Terzopoulos, 2005) (cf. figure 2.28). L'objectif de cette simulation est plutôt de tendre vers la robustesse et le réalisme. Des simulations similaires de Romains sont effectuées en 2007 au sein des rues de Rome (Musse et Thalmann, 2007) et Pompéi (Maïm *et al.*, 2007) (cf. figure 2.28).

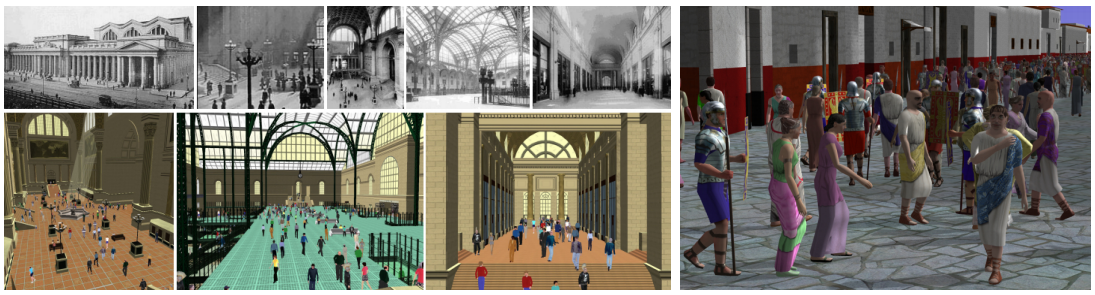


FIGURE 2.28 – Simulation de piétons au sein d'une gare virtuelle *Pennsylvania Station* de New York (Shao et Terzopoulos, 2005) / foule de Romains virtuels dans une rue de l'ancienne Pompéi (Maïm *et al.*, 2007).

Les simulations qui suivent sont ensuite souvent associées à différents systèmes d'interactions. En 2010, une foule de Romains virtuels marchent à travers le Forum pour atteindre des points d'intérêt distribués au hasard. L'utilisateur, à travers son avatar, est libre d'invoquer l'un d'eux pour entamer un dialogue par le biais d'un texte simple (Panzoli *et al.*, 2010) (cf. figure 2.29). Une simulation similaire des habitants de la ville d'Uruk (ville de l'ancienne Mésopotamie vers 5000 av. J.-C) leur permet ensuite de manger, dormir, travailler et communiquer entre eux (Bogdanovych *et al.*, 2012) (cf. figure 2.29).

En 2013, une simulation de communautés mésolithiques permet aux chercheurs de prendre des décisions au sujet du comportement passé. Dans celle-ci, les agents réagissent à des besoins, des contraintes environnementales et de ressources. Des interactions existent également entre la végétation, les animaux et les groupes humains (Ch'ng et Gaffney, 2013) (cf. figure 2.30).

Une autre simulation du port de commerce de Georgetown (État de Penang en Malaisie) dans les années 1800 permet d'observer des groupes ethniques et leurs changements de comportement dus aux interactions interethniques et à l'arrivée de bateaux (Lim *et al.*, 2013)(cf. figure 2.31). Le système simule 236 agents et l'auteur indique que ce faible nombre rend l'observation et la compréhension des activités plus facile.

2.2 Réalité virtuelle

Au-delà de la simulation strictement visuelle, la réalité virtuelle s'intègre petit à petit au sein de l'archéologie dès le début des années 1990. À cette période, Paul Reilly utilise

FIGURE 2.29 – Projet *Roma Nova* (Panzoli *et al.*, 2010) / simulation des habitants de la ville d'Uruk (Bogdanovych *et al.*, 2012).

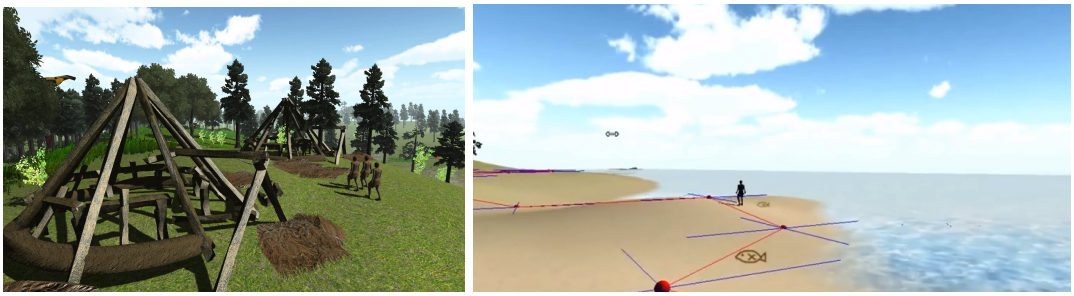


FIGURE 2.30 – Simulation de communautés mésolithiques (Ch'ng et Gaffney, 2013)

FIGURE 2.31 – Simulation de groupes ethniques du port de commerce de Georgetown en 1800 (Lim *et al.*, 2013)

en effet le terme "archéologie virtuelle" (traduite littéralement de "virtual archaeology") pour décrire l'utilisation de simulations de fouilles archéologiques par ordinateur (Reilly, 1991). Il évoque une rupture épistémologique entre l'enregistrement archéologique traditionnel et la représentation des données. La définition a ensuite beaucoup évolué, notamment en 2009 dans la Charte de Londres dans laquelle la visualisation constitue la finalité de l'archéologie virtuelle (Denard, 2009).

Il semble à ce stade qu'il y ait une ambiguïté, car même si la réalité virtuelle semble associée nominalement à l'archéologie virtuelle, on parle pour le moment essentiellement de visualisation. Mais les possibilités liées à l'utilisation de la réalité virtuelle sont déjà bien perçues par la communauté des archéologues et peu avant cette charte, Laia Pujol-Tost évoque clairement l'intérêt de la perception et de l'interaction véhiculées par la réalité virtuelle, au-delà de la seule visualisation (Pujol Tost et Sureda Jubrany, 2007). Dernièrement, le terme est défini comme paradigme d'intégration d'ensembles de données 3D constituant une étape d'analyse itérative pouvant mener à de la prospection, de la fouille, de la recherche historique (Sideris, 2008). Ce paradigme d'intégration sous-entend directement des possibilités d'exploration et d'analyse pour l'utilisateur.

Inversement, la recherche en informatique se nourrit de reconstitutions archéologiques pour par exemple questionner l'utilité des hétérotopies pour la conception de projets de réalité virtuelle (Rousseaux et Thouvenin, 2009). Concept forgé par Michel Foucault, les hétérotopies sont des lieux à l'intérieur d'une société qui obéissent à des règles qui sont autres (Foucault, 2004). Les productions archéologiques 3D ont aussi servi de sujets, clairement pertinents, pour l'émergence d'applications de réalité augmentée en extérieur (Zendjebil *et al.*, 2008) ou sur artefacts (Ridel *et al.*, 2014), et de certaines utilisant des interfaces tangibles pour la réalisation de tâches complexes (Reuter *et al.*, 2010).

Comme précédemment, nous allons tenter d'étudier différents cas d'utilisations de réalité virtuelle pour des applications en archéologie. Nous traiterons d'une part des premiers éditeurs 3D permettant des premières interactions dédiées à l'archéologie (sous-section 2.2.1), et d'autre part des dispositifs de réalité virtuelle menant également à des interactions et navigations immersives (sous-section 2.2.2).

2.2.1 Éditeurs et premières interactions

Les premières traces d'interactions apparaissent "naturellement" au sein d'éditeurs dédiés à l'archéologie. Même si ceux-ci ne peuvent être rattachés en tant que tel à la réalité virtuelle au sens strict, il est intéressant d'étudier leurs offres d'interactions qui peuvent servir de base de réflexion.

2.2.1.1 Déconnectés

C'est en 1998 que l'on voit apparaître *ArcheoBuilder*, une première proposition d'éditeur 3D tchèque dédié à l'archéologie (Suchanek, 1998). Cet éditeur propose notamment de pouvoir insérer/éditer des stocks, palissades, clôtures, objets prédéfinis (stockage de foin, four en pierre, etc.), murs et toits de bâtiments. Il permet également de mapper

des textures (cf. figure 2.32).

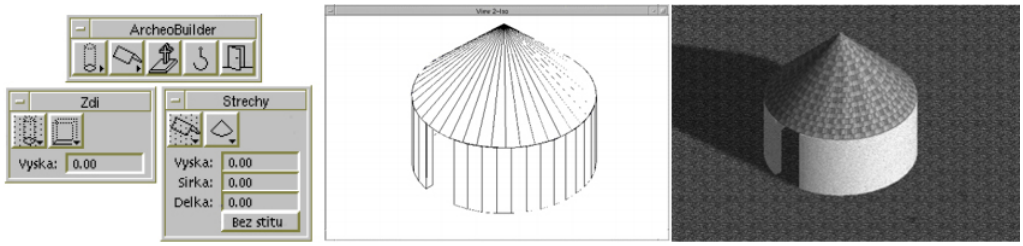


FIGURE 2.32 – Interface, modélisation et rendu dans l'éditeur 3D *ArcheoBuilder* (Suchanek, 1998)

Au même moment, le système *VisTA* propose une interactivité pour l'exploration et la construction 3D de l'évolution de villages anciens autour du site Otsuka (Yokohama, Japon). L'utilisateur choisit des marques au sol pour y associer des types de bâtiments et des noms. L'évolution peut aussi être contrôlée par un panneau de contrôle (Kadobayashi *et al.*, 1999) (cf. figure 2.33).

FIGURE 2.33 – Système VisTA / scène à l'intérieur d'une maison / ajout de nouveaux bâtiments / séquence de simulation / exposition au musée Ori-Amu (Kadobayashi *et al.*, 1999)

Au début des années 2010 surfant sur l'essor des systèmes d'information géographique 2D, ArchField se présente comme un outil temps réel d'enregistrement 3D de données de relevé archéologique. Disponible dans un premier temps sur iPad et stations de travail classiques, il permet la saisie d'informations géolocalisées 2D couplée à de la visualisation 3D (Smith et Levy, 2014) (cf. figure 2.34).

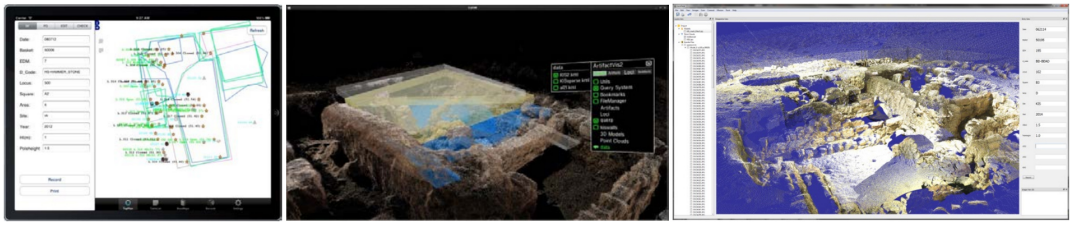


FIGURE 2.34 – ArchField version iPad, représentant des élévations 3D et affichant un nuage de points (Smith et Levy, 2014)

2.2.1.2 Connectés

Vers la fin des années 2000, les possibilités d'exploration et d'édition 3D connectée permettent à l'archéologie de s'en emparer. Le projet *Virtual Rome* propose une exploration interactive de terrains et modèles 3D par le biais d'un navigateur Web (Pescarin *et al.*, 2008) (cf. figure 2.35). Des restitutions de la ville néolithique de Çatal Höyük et de Rome sont également intégrées dans le monde virtuel interactif *Second Life* (Morgan, 2009) (cf. figure 2.35). L'utilisateur peut modifier les propriétés d'objets et réaliser des fouilles virtuelles. Quelques premiers aspects de collaboration y sont également sous-entendus.

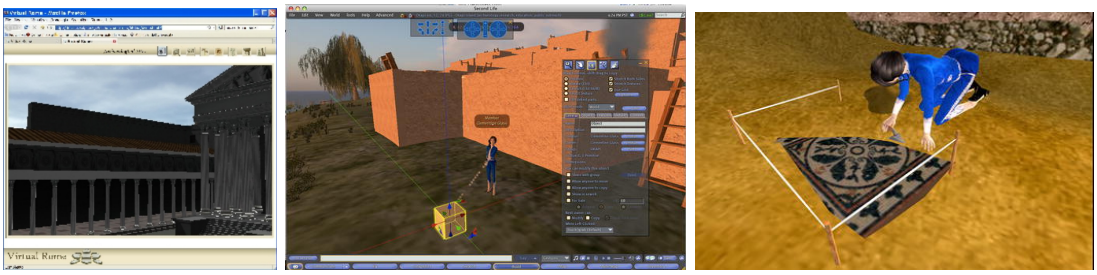


FIGURE 2.35 – Exploration d'un forum impérial par navigateur Web (Pescarin *et al.*, 2008) / modification des propriétés d'objets / fouille virtuelle (Morgan, 2009)

Une étape notable est à signaler en 2015 dans l'évolution de l'interactivité des viewers 3D connectés d'objets et sites patrimoniaux. 3D Heritage Online Presenter (3DHOP) propose des présentations à haute résolution et multi-résolutions de contenus 3D en permettant notamment le contrôle de visibilité de sous-ensembles de pièces, le changement entre le modèle d'un élément actuel et sa version restituée, la navigation par minimap et le focus sur zone d'intérêt avec affichage de description (Potenziani *et al.*, 2015) (cf. figure 2.36).

2.2.2 Dispositifs de navigation immersive

Avec l'arrivée des dispositifs dédiés, des premiers développements d'explorations immersives de sites archéologiques ont émergé. Nous évoquerons une première tendance de dispositifs panoramiques pour ensuite évoquer l'immersion au sein de couches de données. Nous évoquerons enfin l'intégration de plusieurs utilisateurs pour des applications muséales.

2.2.2.1 Immersions panoramiques

En 2000, les archéologues ont l'idée d'utiliser QuickTime VR pour réaliser un environnement virtuel interactif à partir d'images cylindriques du site maya Xunantunich (cf. figure 2.37). L'objectif est l'immersion a posteriori (après fouille) pour la recontextualisation, l'analyse et l'interprétation (Krasniewicz, 2000).

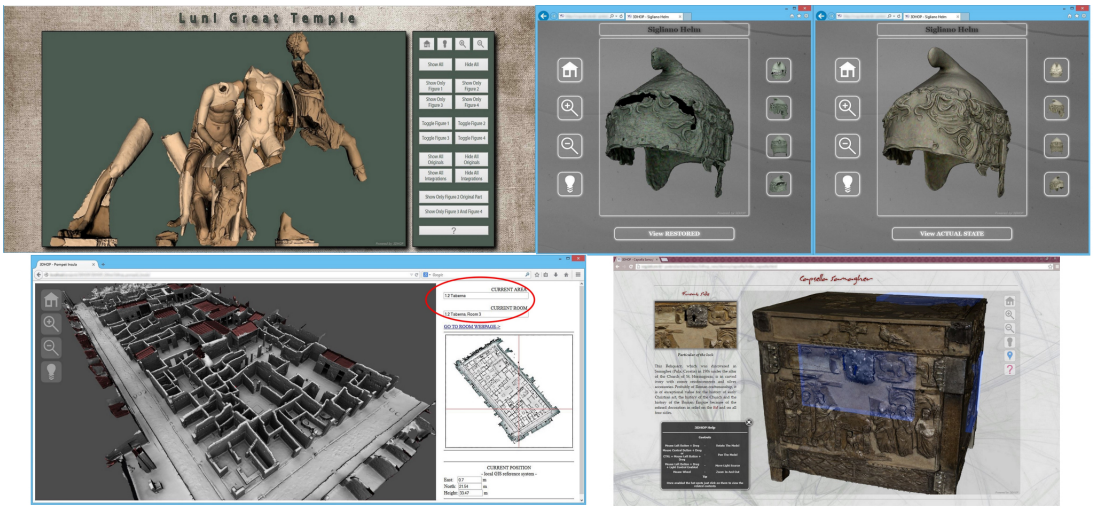


FIGURE 2.36 – 3D Heritage Online Presenter (3DHOP) : Contrôle de visibilité d'un sous-ensemble de pièces de statues, changement entre un modèle de casque actuel et sa version restituée, navigation par minimap et focus sur zone d'intérêt avec affichage de description (Potenziani *et al.*, 2015)

FIGURE 2.37 – Panorama QuickTime VR du site Xunantunich (Krasniewicz, 2000)

Une numérisation de deux tombes Han (Kenderdine *et al.*, 2012) (cf. figure 2.38) et une reconstruction d'un navire du XVII^{e} siècle (Wells, 2008) (cf. figure 2.39) ont ensuite été intégrées dans des systèmes immersifs panoramiques. En leur sein, la navigation interactive, couplée à la visualisation panoramique, semble légitimée pour optimiser la lecture et l'interprétation des paysages.

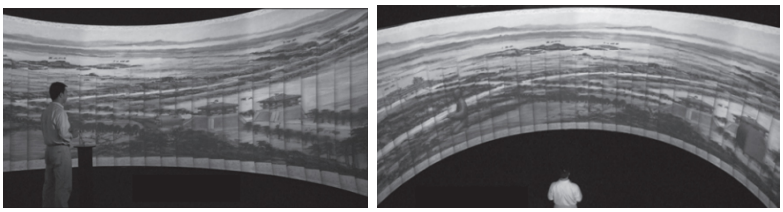


FIGURE 2.38 – Numérisation des tombes Han intégrée dans un AVIE (Advanced Visualisation and Interaction Environment) (Kenderdine *et al.*, 2012)

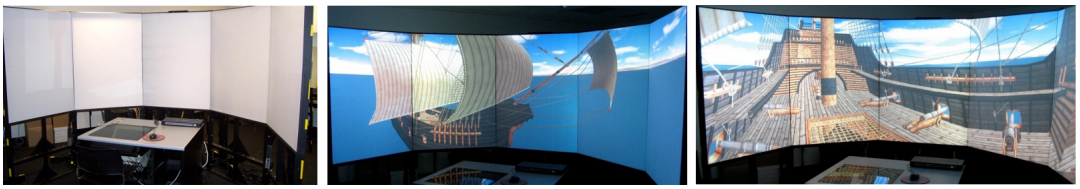


FIGURE 2.39 – Reconstitution d'un navire du XVII^{e} siècle au sein du système immersif Guppy 3D (Wells, 2008)

2.2.2.2 Couches de données

L'idée de pouvoir lire de l'information textuelle sur l'élément que l'on observe dans l'environnement immersif vient assez naturellement. D'un geste de main traqué, le système VisTa permet d'obtenir les références du bâtiment sélectionné (Kadobayashi *et al.*, 1999). Le système TroiaVR semble lui permettre également la navigation temporelle entre différentes couches (Jablonka *et al.*, 2002) (cf. figure 2.40).

FIGURE 2.40 – Systèmes VisTA-walk (Kadobayashi *et al.*, 1999) et TroiaVR (Jablonka *et al.*, 2002) permettant de présenter du contenu 3D et textuel interactif

Le système ARCHAVE permet lui d'afficher et masquer des documents 3D ainsi

que les emplacements des découvertes de lampes, de monnaies et de poteries au sein d'une restitution du temple jordanien de Petra (Acevedo *et al.*, 2001). L'utilisateur peut effectuer des requêtes sur une base de données dont le résultat s'affiche sous la forme de nuages de primitives (cf. figure 2.41).

FIGURE 2.41 – Plan 2D, modèle 3D miniature et à l'échelle, couches d'artefacts au sein d'une restitution du temple jordanien de Petra (Acevedo *et al.*, 2001)

Parallèlement et plus récemment, le système ArtifactVis2 autorise la sélection, notamment immersive, d'éléments de l'environnement et le zoom sur ceux-ci (Smith *et al.*, 2013) (cf. figure 2.42).

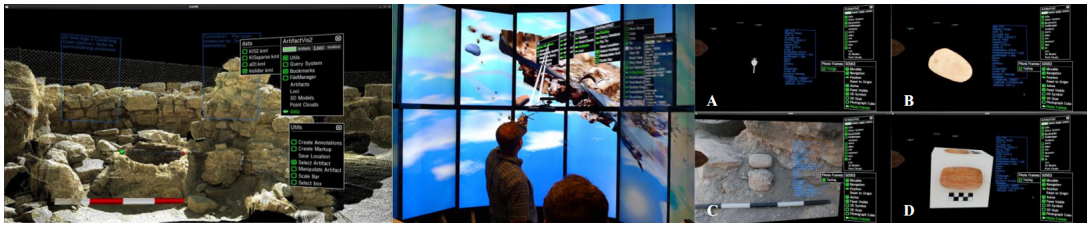


FIGURE 2.42 – Nuage de points dans le système ArtifactVis2, sélection de données dans un TourCAVE et artefacts obtenus (Smith *et al.*, 2013)

2.2.2.3 Multi-observateurs

L'utilisation de dispositifs immersifs pour une exposition muséale implique une adaptation pour de multiples observateurs. En 2000, la Fondation grecque de promotion du monde hellénique met à disposition auprès du jeune public un ImmersaDesk et un ReaCTor. Jusqu'à 10 enfants munis de lunettes stéréoscopiques peuvent s'immerger dans des reconstitutions helléniques (Gaitatzes *et al.*, 2000) (cf. figure 2.43).

Dix ans plus tard, le système Macrographia de visualisation grande échelle multi-utilisateur d'objets de musée est développé. Il localise les utilisateurs et projette sur un écran des images et du texte selon les positionnements et trajectoires des spectateurs (Zabulis *et al.*, 2010) (Grammenos *et al.*, 2013) (cf. figure 2.44).

2.2.3 Interaction avec les objets

L'interaction avec des artefacts archéologiques en réalité virtuelle représente un objectif important pour les archéologues et cet aspect constitue une pièce maîtresse de

FIGURE 2.43 – Jeune public utilisant les systèmes ImmersaDesk et le ReaCTor (Gaitatzes *et al.*, 2000)

FIGURE 2.44 – Système Macrographia de visualisation multi-utilisateur d'objets de musée (Zabulis *et al.*, 2010) et de peinture (Grammenos *et al.*, 2013)

cette thèse. L'étude des principaux travaux sur ce sujet nous a d'abord permis d'observer des démarches de segmentation d'éléments virtuels à partir de sélections. Nous évoquerons ensuite quelques outils d'étude impliquant des interactions sans altération des modèles 3D. Nous traiterons enfin quelques exemples d'usages d'interfaces haptiques et de motion capture.

2.2.3.1 Segmentation

En 2006, des archéologues utilisent un HIVE (*Hull Immersive Visualization Environment*) pour sélectionner en surbrillance des blocs de pierre d'une arche du château d'al-Shawbak (Jordanie). L'utilisateur peut masquer les pierres surlignées (ou celles qui ne le sont pas) afin d'étudier la construction (Drap *et al.*, 2006). En 2011, une démarche similaire est appliquée à la problématique sous-marine sous différents degrés d'immersion (Haydar *et al.*, 2011) (cf. figure 2.45).

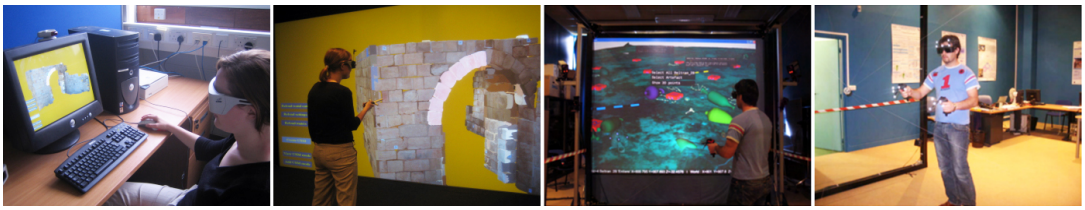


FIGURE 2.45 – Surbrillance de blocs de pierre d'une arche du château d'al-Shawbak sur PC, au sein d'un HIVE (Drap *et al.*, 2006) et sélection d'artefacts sous-marins à la plateforme technologique EVR@ (Université d'Evry Val d'Essonne) (Haydar *et al.*, 2011)

2.2.3.2 Sans altération

K. Bale et ses collaborateurs ont projeté à l'échelle une reconstitution de l'exposition British Empire de 1938 sur un très grand écran du Digital Design Studio. Trois chercheurs en architecture munis de tablettes pouvaient respectivement contrôler la caméra et la navigation, afficher et saisir des annotations (Bale *et al.*, 2011) (cf. figure 2.46).

En 2010, M. Forte expérimente l'archéologie téléimmersive. Un ensemble de caméras stéréo capturent une vidéo 3D de l'utilisateur en temps réel pour créer son avatar. Il se voit sur un écran ainsi immergé au sein d'un environnement virtuel dans lequel il peut annoter, illuminer, mesurer et saisir des objets 3D (Forte et Kurillo, 2010) (cf. figure 2.47).

2.2.3.3 Interfaces haptiques

En 2006, interface haptique couplée avec un moteur physique permet aux utilisateurs d'appréhender les efforts impliqués dans la construction d'éléments architecturaux d'un temple grec (Messène) et leurs changements à travers les âges (Christou *et al.*, 2006) (cf. figure 2.48).

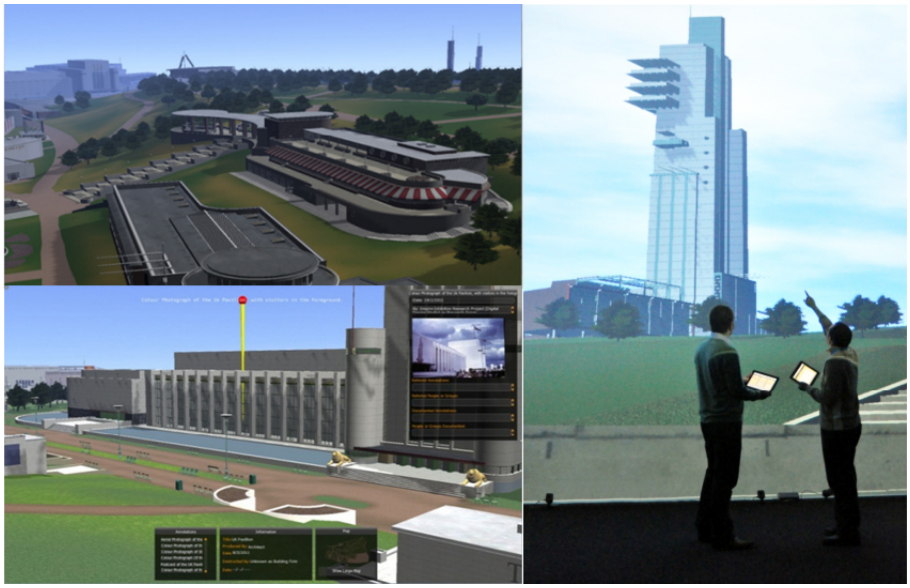


FIGURE 2.46 – Processus d'annotation avec tablettes d'une reconstitution de l'exposition British Empire de 1938 (Bale *et al.*, 2011)

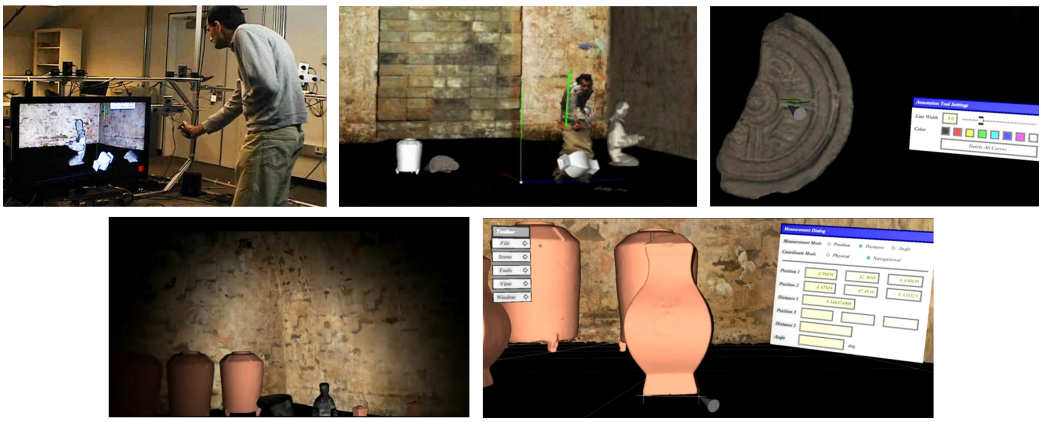


FIGURE 2.47 – Manipulation d'objet, dessin d'annotations, éclairage à la torche virtuelle et mesure en archéologie téléimmersive (Forte et Kurillo, 2010).

FIGURE 2.48 – Interface haptique pour la construction d'éléments architecturaux d'un temple grec (Christou *et al.*, 2006)

Celles-ci ont ensuite été utilisées pour simuler le toucher d'œuvres de musées virtuels (Loscos *et al.*, 2004) (Carrozzino et Bergamasco, 2010) et à différentes échelles de détails (Aniyath *et al.*, 2014) (cf. figure 2.49).

FIGURE 2.49 – Toucher d'une statue via un dispositif haptique à deux points contacts (Loscos *et al.*, 2004), utilisation d'un exosquelette muni d'un dispositif haptique dans un musée virtuel (Carrozzino et Bergamasco, 2010) et rendu haptico-visuel du modèle 3D d'un bouddha (Aniyath *et al.*, 2014)

2.2.3.4 Motion capture

La motion capture est utilisée en archéologie dès le début des années 2000s. Une peinture de l'ancienne capitale Chang'an de la province du Shaanxi (Chine) illustre des scènes de danse de la dynastie Tang. Les chercheurs ont ainsi l'idée de reconstituer ces scènes grâce à une danseuse spécialisée dans un dispositif de motion capture (Tang et Liu, 2002)(cf. figure 2.50).

FIGURE 2.50 – Danseuse sur une peinture murale, motion capture et restitution animée (Tang et Liu, 2002).

En 2010, un système de réalité mixte permet au public d'assister à un spectacle de 45 min narrant la quête d'un père et son fils dans des reconstitutions de Milet et Priène, deux villes de la Grèce antique. Un avatar d'Ésope (écrivain grec), joué en back stage par un acteur en motion capture, est projeté sur un écran semi-transparent, derrière lequel des acteurs réels jouent devant un autre écran opaque projetant le décor (Andreadis *et al.*, 2010) (cf. figure 2.51).

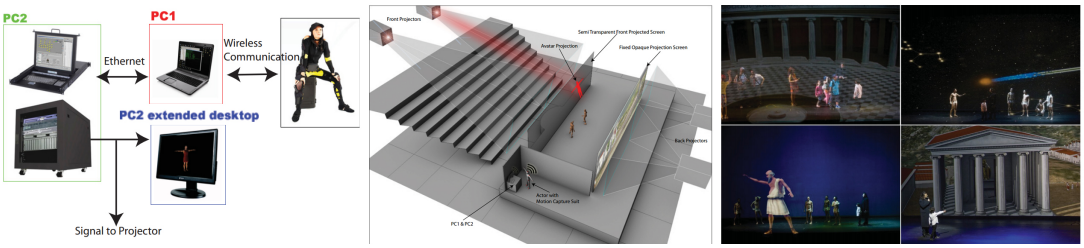


FIGURE 2.51 – Système de motion capture, de projection des avatars et mise en scène au sein de décors numériques pour une prestation théâtrale (Andreadis *et al.*, 2010).

Plus tard, la plateforme *Motion in place* cherche à permettre la reconstitution de mouvements humains du passé. Dans son papier, S. Dunn évoque la reconstitution de mouvements d'habitants d'une maison du sud britannique à l'âge de fer (Dunn *et al.*, 2012) (cf. figure 2.52). L'outil de capture est l'*Animazoo Sonar Hybrid Technology* et l'animation du personnage s'effectue avec Unity3D.

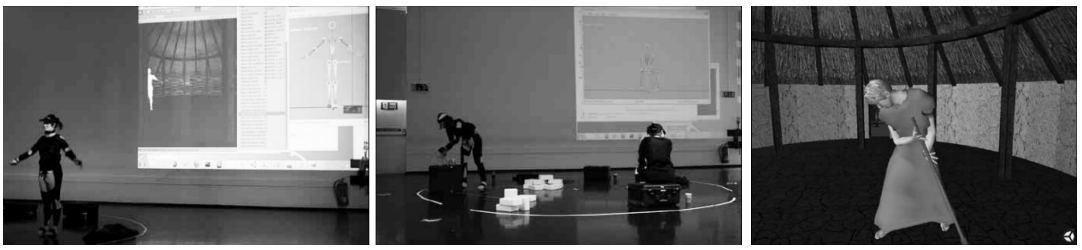


FIGURE 2.52 – Reconstitution de mouvements d'habitants d'une maison du Sud de l'Angleterre à l'âge de fer (Dunn *et al.*, 2012)

Dernièrement, la motion capture a permis l'étude de mouvements de mains pour taille de bambou (Borel *et al.*, 2016). L'objectif a été de décrire et quantifier les stratégies de manipulation d'outils préhistoriques en lien avec l'évolution de la dextérité des mains (cf. figure 2.53).

2.2.4 Contexte matériel et logiciel mis à disposition

Avant d'entrer dans le détail des travaux effectués dans le cadre de cette thèse, il nous semblait important de relater les aspects matériels et logiciels mis à disposition. La majorité des intégrations de modèles 3D ont été réalisées pour ces travaux au sein d'une plateforme de réalité virtuelle unique, qui nous a permis d'appréhender un large spectre de problématiques pleinement transversales, entre informatique et archéologie.

2.2.4.1 Architecture matérielle

La plateforme immersive de réalité virtuelle Immersia (Gaugne *et al.*, 2014), basée à l'IRISA, est une grande salle de réalité virtuelle dédiée aux interactions temps réel, multimodales (vision, son, haptique, et interface cerveau-ordinateur) et immersives. Elle

FIGURE 2.53 – Capture de mouvements de mains avec capteurs lors d'une séance de taille de bambou suivant plusieurs techniques (Borel *et al.*, 2016)

accueille des expériences scientifiques utilisant des applications de réalité virtuelle interactives donc, mais aussi collaboratives puisqu'elle peut gérer de multiples utilisateurs locaux ou distants.

Il s'agit de quatre écrans de verre (cf figure 2.54) disposés de la manière suivante : un à l'avant, deux sur les côtés et un au niveau du sol. Les dimensions de la salle sont de 9.6m de large, 2.9m de profondeur et 3.1m de haut.

La localisation s'effectue grâce à un système de tracking optique qui couvre la totalité de l'espace immersif. Seize caméras suivent ainsi les objets réels. La plupart des interactions, notamment de navigation, s'effectuent à l'aide d'un périphérique tracké équipé de commandes numériques (boutons) et analogiques (joystick). Le *Flystick* de marque *ART* (Advanced Realtime Tracking) a été celui principalement utilisé dans le cadre des travaux de cette thèse. La stéréoscopie active s'effectue par le biais de lunettes à cristaux liquides synchronisées par radiofréquence avec les projeteurs et trackées par les caméras. Les images, recalculées lorsque l'utilisateur se déplace, disposent d'une haute résolution (pixels de 1.4mm) et d'une homogénéisation des couleurs. Le son est géré par un processeur *Yamaha*, relié soit à des enceintes *Genelec* (son multicanal 10.2) ou à un casque *Beyer Dynamic* (son surround virtuel 5.1), et s'adapte à la position de l'utilisateur. Le système de calcul et de rendu est composé d'un cluster associant un ordinateur par écran, attribuant à chaque écran une fenêtre unique par le biais de la technologie NVIDIA® SLI® Mosaic. La plateforme Immersia a fait partie du projet européen Visionair (Gaugne *et al.*, 2012) ce qui lui a permis d'être ouverte et facilement accessible à un large éventail de communautés de recherche. Compte tenu des intérêts scientifiques, ces conditions perdurent aujourd'hui.

2.2.4.2 Architectures logicielles

Collaviz est une plateforme logicielle open source dédiée à la collaboration à distance

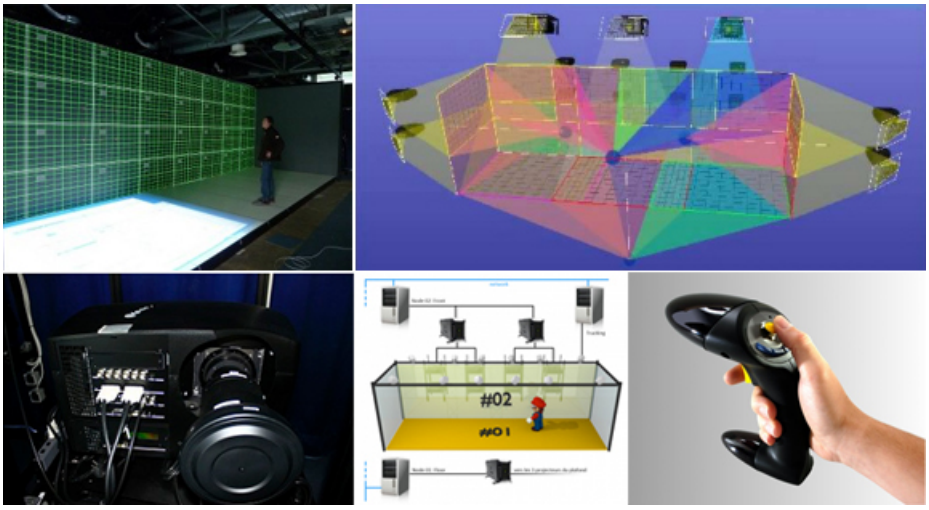


FIGURE 2.54 – Disposition et matériels de la plateforme Immersia

pour la conception et la visualisation d'applications fondées sur de la simulation scientifique (cf figure 2.55) (Fleury *et al.*, 2012). Collaviz a d'abord été utilisée dans le cadre d'Immersia. Elle intégrait trois librairies graphiques *Java* (*Java3D*, *jMonkeyEngine* et *jReality*) pour permettre à l'utilisateur de choisir, parmi les trois viewers proposés, le mieux adapté aux dispositifs matériels utilisés. Pour ce qui est de l'aspect collaboratif, *Collaviz* repose sur une architecture client/serveur avec un serveur capable de stocker de gros volumes de données, d'héberger des moteurs de traitement et de gérer l'accès à ces données de façon sécurisée (Fleury, 2012). Un viewer basé sur *OpenSG* a ensuite été développé et intégré au framework *Collaviz* pour améliorer l'efficacité des rendus immersifs. L'interfaçage du système *ART* avec *Collaviz* est réalisé avec *VRPN (Virtual Reality Peripherical Network)*. Parallèlement et sur une première version d'un environnement virtuel (Gaugne et al., 2013), la plate-forme de développement et d'exécution d'applications modulaires *OpenMASK* (Modular Animation and Simulation Kit) a aussi été utilisée. La création d'un environnement virtuel avec *OpenMASK* consiste à sélectionner, configurer des objets de simulation appropriés (unité de modularité) et à choisir un noyau d'exécution répondant aux besoins de l'application. Ces objets servent à modéliser aussi bien une entité, un comportement ou le contrôle d'un mouvement qu'un périphérique d'interaction [1]. L'architecture implémentée dans Immersia fonctionne sur un HP Z400, Intel Xeon CPU quad-core W3540, 2.93 GHz, 6 GB RAM, Windows 7, 64 bits.

Parallèlement à l'architecture logicielle *Collaviz*/*OpenSG*, une solution commerciale conjuguant *Unity3D* et *MiddleVR* a été implémentée. Le moteur de jeu *Unity3D* ne supportant pas nativement certaines fonctions, la librairie *MiddleVR* a été associée pour gérer les périphériques d'entrée, la stéréoscopie, l'exécution distribuée et la visualisation multi écran. Comme pour *Collaviz*, le système *ART* et le *Flystick* sont impliqués.

1. http://www.irisa.fr/immersia/openmask

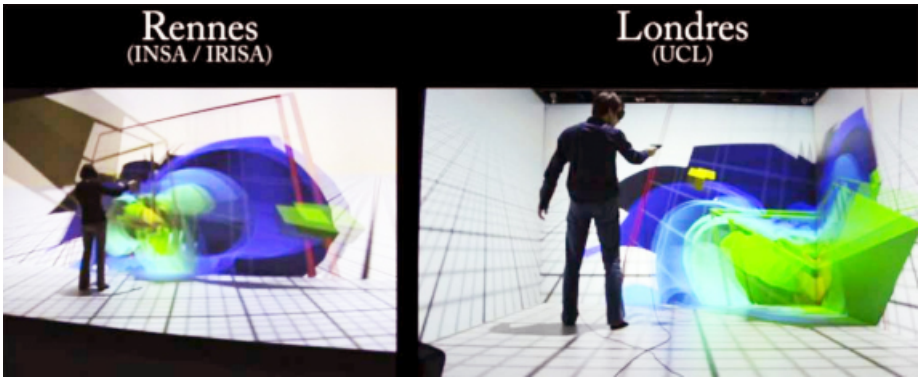


FIGURE 2.55 – Collaboration à distance avec la plateforme *Collaviz*

2.2.4.3 Comparaison des implémentations

Testée avec un des premiers environnements virtuels de cette thèse (Gaugne et al., 2012), *Collaviz/OpenSG* constitue une plateforme logicielle très puissante. Avec elle, le travail en collaboration temps réel, à distance et sur le même environnement virtuel, fonctionne pleinement sur une large gamme de machines. L'intégration de modèles 3D nécessite cependant quelques manipulations et la prise en main générale n'est pas forcément facile.

La configuration *Unity3D/MiddleVR* est, quant à elle, simple à utiliser, car elle propose des interfaces graphiques intuitives et une intégration des modèles très rapide avec très peu de manipulations. Cependant, une instance indépendante fonctionne sur chaque noeud du cluster et ce problème de synchronisation peut impliquer une baisse du nombre de FPS. Testées en 2012 sur l'exemple du cairn de l'île Carn traité dans la suite de ce manuscrit (Gaugne et al., 2012), les performances graphiques ont été les suivantes :

1. *Collaviz/OpenSG* : 36 FPS
2. *Unity3D (v3)/MiddleVR* :
   (a) Unity native fast quality : 34 FPS
   (b) Good quality : 22 FPS
   (c) Fantastic quality : 17 FPS

Concernant ces niveaux de qualité, ils concernent l'affichage, au sein de Unity, des éclairages, des ombres, de la compression d'image, etc. Les qualités de rendu proposées par le moteur ayant été améliorées depuis ce test, la configuration *Unity3D/MiddleVR* est à l'heure actuelle toujours utilisée.

Liées à des travaux de recherche, *Collaviz*, *OpenSG* et *OpenMASK* sont des plateformes logicielles qui ne sont cependant plus maintenues au moment de l'écriture de cette thèse. À l'heure actuelle, *Unity3D* bénéficie d'une communauté très active et s'est imposée comme l'une des principales plateformes de développement. En cette fin d'état de l'art, il est nécessaire d'indiquer que le choix de ces solutions techniques n'a jamais constitué un des objectifs de cette thèse, définis dans le chapitre suivant.

2.3 Observations et premières explications

Nous avons pu observer que la simulation a permis d'apporter des réponses à des questions archéologiques. Souvent visuelle, hors ligne et concentrée sur un seul aspect, en raison de limitations en matière de moyens techniques et humains, elle peut cependant impliquer certaines frustrations chez l'archéologue qui doit considérer simultanément plusieurs aspects sur lesquels il pourrait aussi interagir. Parallèlement, la réalité virtuelle est utilisée dans le domaine du patrimoine culturel, et plus spécifiquement en archéologie, depuis de nombreuses années, mais elle demeure souvent considérée comme purement ludique, car ne permettant pas de débloquer certaines démonstrations de preuve ou de certains raisonnements archéologiques.

Un premier élément d'explication à ces observations est la complexité des nombreuses professions liées à l'archéologie (paléontologie, paléozoologie, géographie, géologie, histoire de l'art, etc...), tant d'un point de vue technique que technologique, qui induit des besoins élevés en matière de qualité des modèles 3D, simulations et interactions. Mais l'amélioration seule de ces aspects informatiques ne semble pouvoir constituer une solution absolue, car leur évolution rapide se poursuit indépendamment, sans véritablement réduire l'exceptionnalité de leur apport scientifique en archéologie.

Autre paradoxe, ils offrent des possibilités d'études quantitatives qui peuvent nourrir profondément le discours scientifique, mais aussi rester masquées par le clinquant de la 3D (Hermon *et al.*, 2005) et même craintes par certains archéologues technophobes. Les arguments critiques allant contre une démarche de quantification systématique appliquée aux sciences humaines sont d'ailleurs nombreux, notamment lorsque celle-ci sert d'outil politique et non de preuve.

Cependant, du platonisme à nos jours, chaque nouvel exemple illustrant la complémentarité entre les sciences humaines et les sciences dites "exactes" apporte son lot de bénéfices qui doit être capitalisé (Bryon-Portet, 2010). Il s'agit alors de réfléchir à comment répondre à des besoins immédiats et à moyen terme d'archéologues, étalés sur un large spectre allant du théorique au pratique, sans perdre de vue l'objectif qu'est l'étude de l'Homme sur des plans individuels et collectifs.

Chapitre 3

Mise en place d'un processus transdisciplinaire

L'élément déclencheur de cette thèse est la volonté de tenter de déverrouiller les situations énoncées dans nos conclusions des chapitres précédents. En résumé, nous pouvons évoquer les principales contraintes liées à l'archéologie pouvant contrecarrer des preuves et raisonnements. Celles-ci sont :

- Les questions de sécurité et d'accès aux sites (cf. figure 3.1)
- L'état de conservation des vestiges (cf. figure 3.1)
- Le temps et les financements (RedactionNDA, 2013)
- L'implication et l'autonomie des archéologues vis-à-vis des productions 3D et de leur utilisation

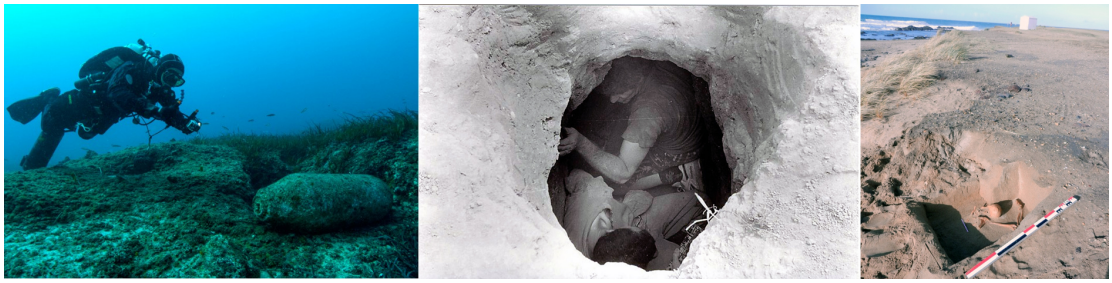


FIGURE 3.1 – Illustration des questions de sécurité, d'accès aux sites et de conservation des vestiges (exemple de l'érosion du littoral (Chauviteau, 2016))

Les solutions que nous allons développer dans la suite sont :

- La production adaptative et itérative d'environnements archéologiques 3D guidée par l'archéologue
- L'utilisation d'environnements archéologiques virtuels

Pour cela, il nous a d'abord fallu développer un processus que nous allons décrire dans ce court chapitre. Après avoir défini quelques points sur lesquels se basent les

contributions de cette thèse (section 3.1), nous décrirons en premier lieu son contexte (section 3.2), puis nous procéderons à la présentation d'un corpus de sites archéologiques, autour desquels nous avons pu effectuer des productions 3D (section 3.3), et à son analyse (section 3.4).

3.1 Définitions

Avant toute chose, il est important de spécifier que l'ensemble des travaux décrits dans cette thèse repose sur des notions multidisciplinaires bien définies de part et d'autre. L'archéologie et l'informatique utilisent en effet des terminologies propres présentant différents degrés d'évolution. Ainsi afin de solidifier le cadre transdisciplinaire de cette thèse, il est apparu pertinent de rappeler ou d'établir quelques définitions :

- Un *site archéologique* est tout d'abord un lieu dans lequel existent (ou ont existées) des preuves de l'activité humaine passée (Wikipedia, 2016b).
- D'un point de vue spatialement et temporellement plus étendu, nous parlerons d'*environnement archéologique* comme d'un ensemble d'éléments, biotiques ou abiotiques, existants ou hypothétiques, avoisinant, inclus et interagissant au sein d'un site archéologique à un moment donné.
- Pour bien distinguer les contributions, nous évoquerons un :
    - *Environnement archéologique 3D* comme un ensemble de nuages de points et/ou maillages 3D texturés représentant les surfaces et/ou volumes d'éléments d'un environnement archéologique, pouvant elles-mêmes contenir d'autres surfaces et/ou volumes. Une urne funéraire contenant des éléments peut, par exemple, être représentée comme un élément multicouche.
    - *Environnement archéologique virtuel* défini comme monde virtuel dans lequel le comportement d'un environnement archéologique 3D est simulé par un système basé sur des techniques de réalité virtuelle.

3.2 Contexte

Les modèles 3D utilisés dans cette thèse ont été produits dans un contexte particulier. Avant d'évoquer la structure de production de ces modèles (sous-section 3.2.2), nous tenterons d'abord de délimiter un cadre théorique (sous-section 3.2.1) nous permettant d'attester notre conscience de la variabilité des niveaux de pertinence scientifique des modèles exploités.

3.2.1 Limitations

Pour évaluer la longueur de frontières entre nations, Lewis Fry Richardson découvrit que plus l'unité minimale de mesure utilisée est petite, plus la frontière est longue, mais sans devenir infinie (cf. figure 3.2). Benoît Mandelbrot reprit cette recherche en 1967 dans son article sur une des premières études concernant les fractales (Mandelbrot, 1967).

FIGURE 3.2 – Mesures des côtes britanniques à différents échantillonnages

Par extension, la numérisation 3D, à un échantillonnage donné, subit le même paradoxe, et il est important d'être conscient qu'il peut toujours lui échapper un détail, majeur pour l'archéologue, mais suffisamment petit pour passer entre deux points relevés.

Pour ce qui est des restitutions de l'hypothétique, nous souhaitons baser nos réflexions sur une idée de Gilles Deleuze qui déclarait en 1983 : "oui, tout est possible, mais tous les possibles ne sont pas compossibles les uns avec les autres" (Deleuze, 1983). Il faisait écho à la notion leibnizienne de compossibilité qui veut qu'il ne suffise pas que quelque chose soit possible, il faut que cette chose soit compossible avec d'autres qui constituent le monde réel. Compte tenu des connaissances et logiques humaines à un moment donné, l'objectif d'une restitution d'environnement archéologique n'est ainsi pas l'obtention de la vérité, mais un ensemble maximalement compossible de propositions ou d'états. Pour accompagner les producteurs de restitutions vers ce but, des échelles de niveau de preuve archéologique sont notamment de plus en plus utilisées (Resco et Figueiredo, 2014).

Conscient de ces limitations à la source de nombreuses critiques, nous pensons alors que produire des environnements archéologiques 3D est cependant scientifiquement légitime, à condition bien sûr de le faire sous le contrôle d'archéologues.

3.2.2 Structure de production de données archéologiques 3D

Pour déverrouiller les situations évoquées précédemment, l'idée a été dans un premier temps de développer une structure permettant 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. Ainsi, le Conservatoire Numérique du Patrimoine Archéologique de l'Ouest (CNPAO [1]) a vu le jour début de mars 2013 (Barreau et al., 2013) au sein du Centre de Recherche en Archéologie, Archéosciences et Histoire (UMR 6566 CReAAH). Une collaboration avec l'Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires (UMR 6074 IRISA) a

1. cnpao.univ-rennes1.fr

ensuite eu pour but d'explorer et illustrer l'intérêt de la réalité virtuelle pour aider le raisonnement du chercheur en archéologie. Concernant le travail effectif lié à cette thèse, on peut noter la participation à la création et gestion du CNPAO, qui est d'ailleurs à l'origine de ce doctorat. Plusieurs sources de financement ont permis le recrutement d'un infographiste, parfois accompagné de stagiaires, qui a effectué la majorité des productions 3D ayant eu lieu de 2013 à 2016. Ainsi, nous avons pu appréhender et organiser les liens entre des besoins d'archéologues, des possibilités et contraintes techniques de production et d'exploitation présentées dans la suite.

De son origine jusqu'à maintenant, le CNPAO s'est fixé quatre vocations majeures, en accord avec la charte de Londres [2] :

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.

Avant de tenter de relier plus en profondeur productions 3D, simulations, réalité virtuelle et problématiques archéologiques, il s'agit dans ce chapitre de présenter et analyser un corpus de projets du CNPAO étalés sur une période allant de début 2013 à fin 2015 (Barreau et al., 2016). L'objectif est d'appréhender l'ensemble des matières premières sur lesquelles se sont développées les réflexions décrites à la suite de ce chapitre.

3.3 Présentation du corpus

En mars 2016 et après trois années d'existence, le corpus comprend 62 études de différents sites, principalement situés dans l'Ouest de la France (cf figure 3.3). Au moment de l'écriture de cette thèse, ce corpus est un peu plus étoffé, mais sa différence de volume influence peu l'étude suivante qui a été menée en septembre 2016.

Afin de classer les sites suivant des ordres de grandeur de quantité de travail lié à la production des modèles 3D, dix types ont été identifiés : cavité souterraine naturelle, zone de fouille archéologique (Laporte et al., 2015), mégalithe (Mens et al., 2016) et amas artificiel de pierres (Gaugne et al., 2012), grande zone littorale, objet (Safa et al., 2016), bâtiment (Barreau et al., 2014b), agglomération de bâtiments (Gaugne et al., 2013), structure défensive (Barreau et al., 2013), sépulture et navire (Barreau et al., 2015a) (cf. figure 3.4).

Le corpus couvre aussi les périodes suivantes :

- préhistoire : 18 éléments
- Protohistoire : 10 éléments

2. www.londoncharter.org

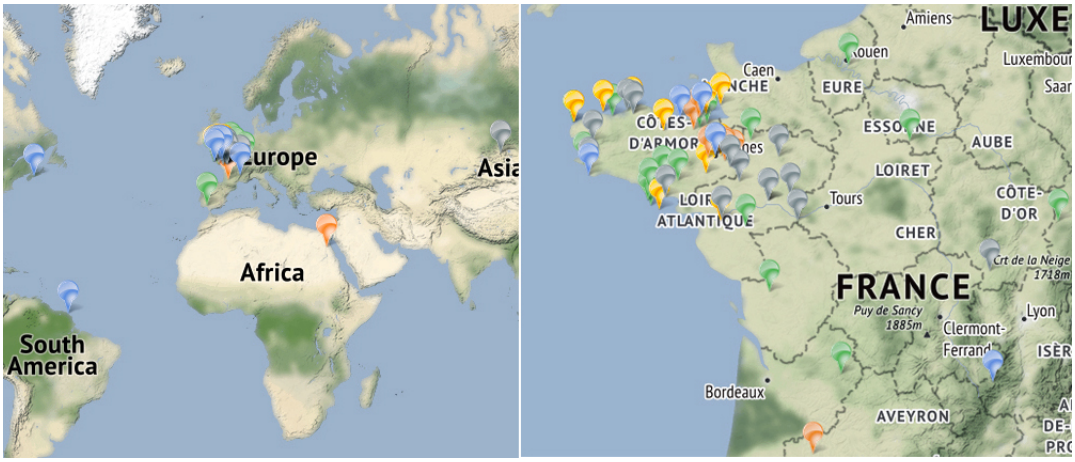


FIGURE 3.3 – Répartition géographique des sites du corpus du CNPAO

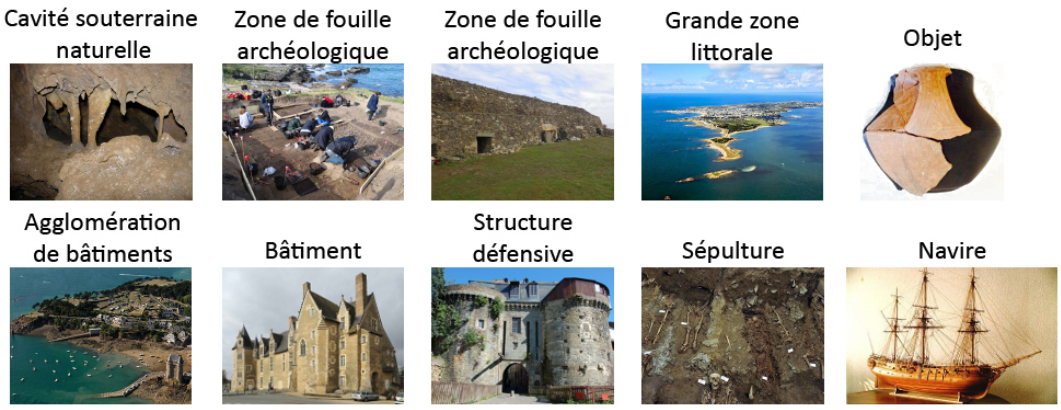


FIGURE 3.4 – Typologie expérimentale des sites du corpus

- Antiquité : 8 éléments
- 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. Trente-huit 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 à l'embauche 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 3.5). Cette réduction s'explique également par l'expérience acquise des producteurs 3D et des archéologues impliqués.

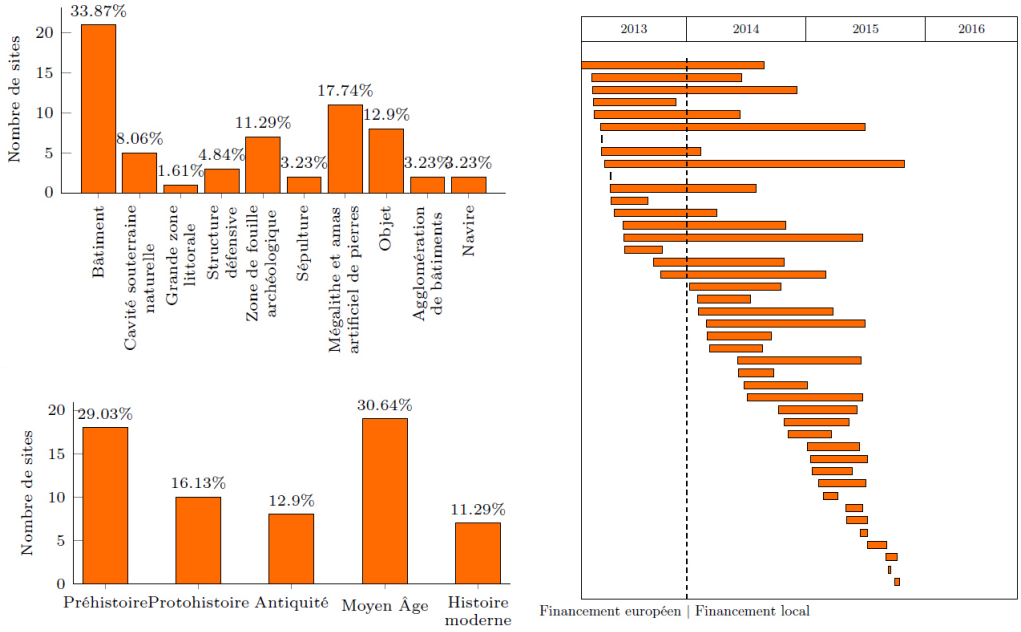


FIGURE 3.5 – Répartitions typologiques, chronologiques et diagramme de gantt

3.4 Analyse du corpus

Les projets ont été initiés par des archéologues présentant des objectifs et des 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 scanner laser (dans le cas de l'utilisation d'un scanner 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, soit un mélange des deux. Il est important de signifier qu'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 fondées sur des numérisations de parties existantes combinées à la modélisation de parties hypothétiques. Nous aborderons ici une étude des numérisations (sous-section 3.4.1), modélisations (sous-section 3.4.2), rendus (sous-section 3.4.3) et métriques organisationnelles (sous-section 3.4.4).

3.4.1 Numérisation

Comme évoqué précédemment, le processus de numérisation peut se fonder sur diverses technologies. Nous avons utilisé la photogrammétrie, le scanner 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, en raison notamment de sa location à un prix réduit, 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 telles que les petites cavités souterraines et les sépultures du corpus. Les scanners *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, nous avons eu recours à la photogrammétrie et/ou le scanner laser, et ce, en fonction de la taille des structures (Barreau et al., 2013) (Ramírez *et al.*, 2015). Cette double utilisation a également été pratiquée pour une épave dans un contexte d'estran (Hulot et al., 2015). La durée moyenne d'une opération de numérisation 3D dépasse légèrement 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 3.6).

3.4.2 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 3.7).

3.4.3 Rendus

À partir du corpus, nous pouvons distinguer cinq types de rendus répondant aux demandes des archéologues (cf. figure 3.8) :

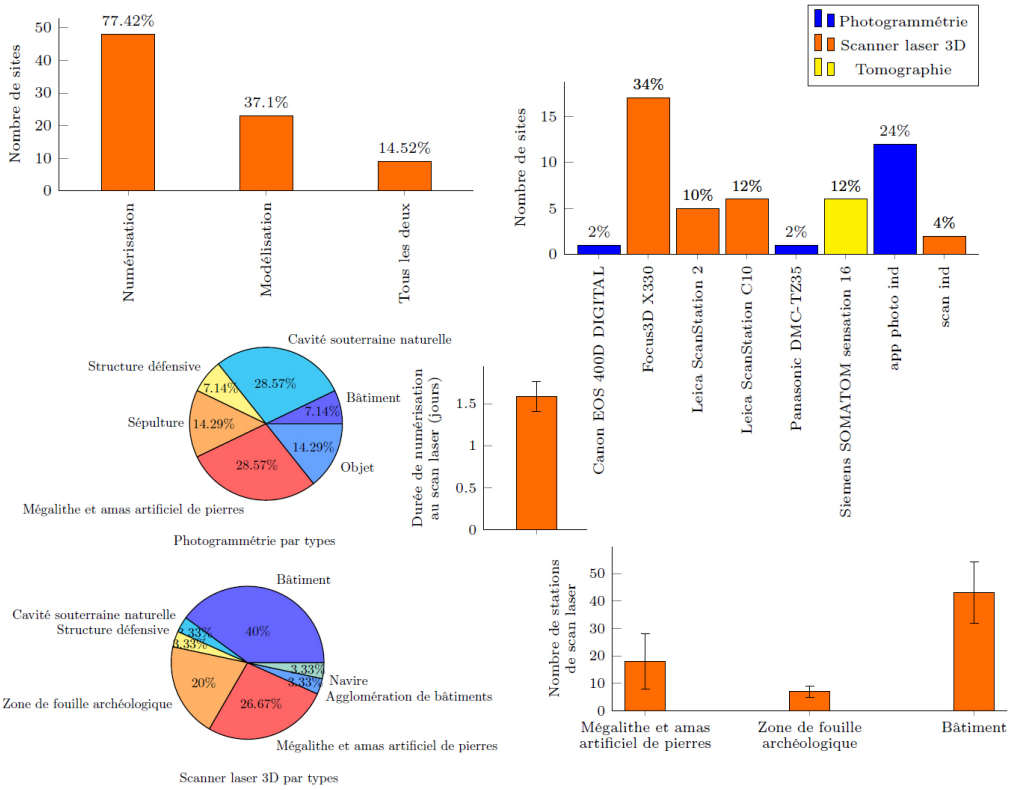


FIGURE 3.6 – Répartitions des variables concernant les numérisations

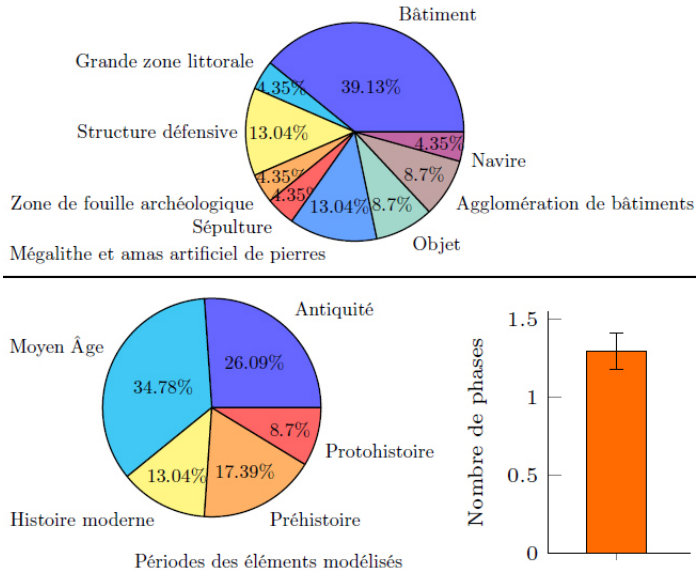


FIGURE 3.7 – Répartitions des variables concernant les modélisations

1. Section 3D (Safa et al., 2016) : Coupe 3D dans un nuage de points 3D afin d'isoler une zone d'intérêt
2. Section transversale (Hulot et al., 2015) : Intersection d'un plan et d'un nuage de points 3D
3. Ortho-image (Barreau et al., 2013) : Vue orthographique d'une zone d'intérêt au sein d'un nuage de points 3D.
4. Rendu photo-réaliste (Bernard et al., 2017) : Image calculée par un moteur de rendu photoréaliste précisément paramétré à partir un modèle 3D texturé
5. Rendu schématique (Laporte et al., 2015) : Image calculée par un moteur de rendu à partir d'un modèle 3D non texturé

FIGURE 3.8 – Typologie expérimentale des rendus fournis aux archéologues

Pour chaque projet, plusieurs rendus peuvent être produits selon différents objectifs et leur nombre moyen est d'un peu plus de quatre. 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 de l'importante quantité 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 3.9).

3.4.4 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 correspondant à 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 librairies, afin d'enrichir la scène, et ce pour plus de réalisme. Il existe également de nombreuses versions d'un rendu en raison du niveau élevé d'exigence de l'archéologue.

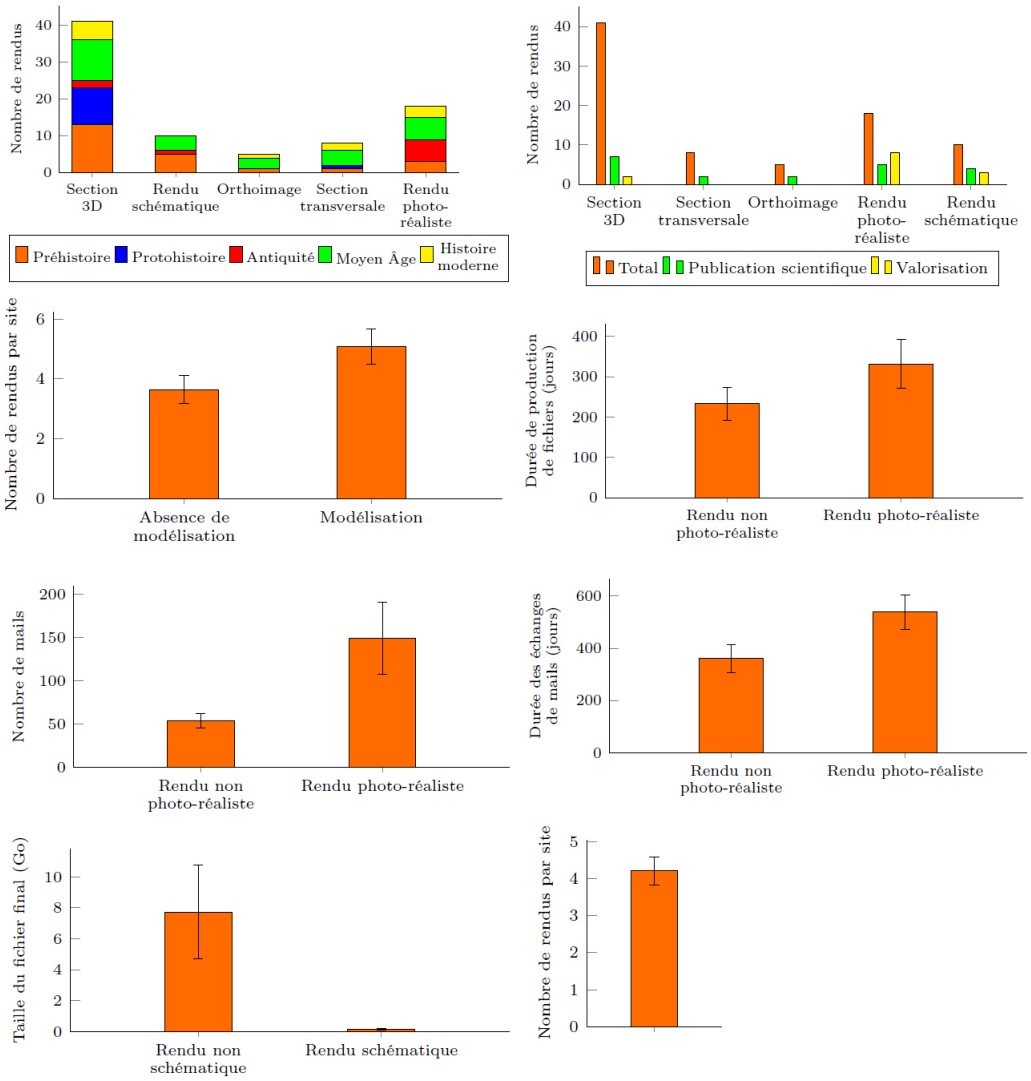


FIGURE 3.9 – Répartition des variables concernant les rendus

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. On compte en moyenne 90 messages envoyés par cinq à six personnes, par site. Comme nous le verrons dans la suite, l'intégration en réalité virtuelle implique 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 3.10).

3.5 Considérations empiriques

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 scanner laser permet une organisation en amont non négligeable. L'utilisation systématique et simultanée de la photogrammétrie et de la tomographie pour des numérisations internes et externes d'objets archéologiques offre des apports scientifiques majeurs. Les rendus de sections 3D de nuages de points sont faciles à mettre en oeuvre 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. Quant aux objectifs, le volume de production de rendus, de publications scientifiques et de démarches de valorisation sont interdépendants.

La proposition d'intégration plus importante de l'archéologue dans les processus de production d'images 3D anatomisés dans la suite nous a permis de mettre en lumière quatre phénomènes intrinsèquement liés :

- L'archéologue participant à la production est le seul a connaître les limites de ses hypothèses et ce que sa communauté peut lui reprocher scientifiquement s'il les franchit.
- Même si ce ne sont pas ses mains qui effectuent les numérisations et/ou les modélisations, son implication itérative implique une prise en considération critique des techniques de production 3D et une atténuation de l'effet "boîte noire" inhérent aux pratiques d'infographie classiques.
- L'image a tendance à faire d'une hypothèse une vérité et peut véhiculer des messages symboliques (Barthes, 1964) ou même de la mythification (Chassay, 2006).
- La production à un niveau de détail n appelle inexorablement le désir de production

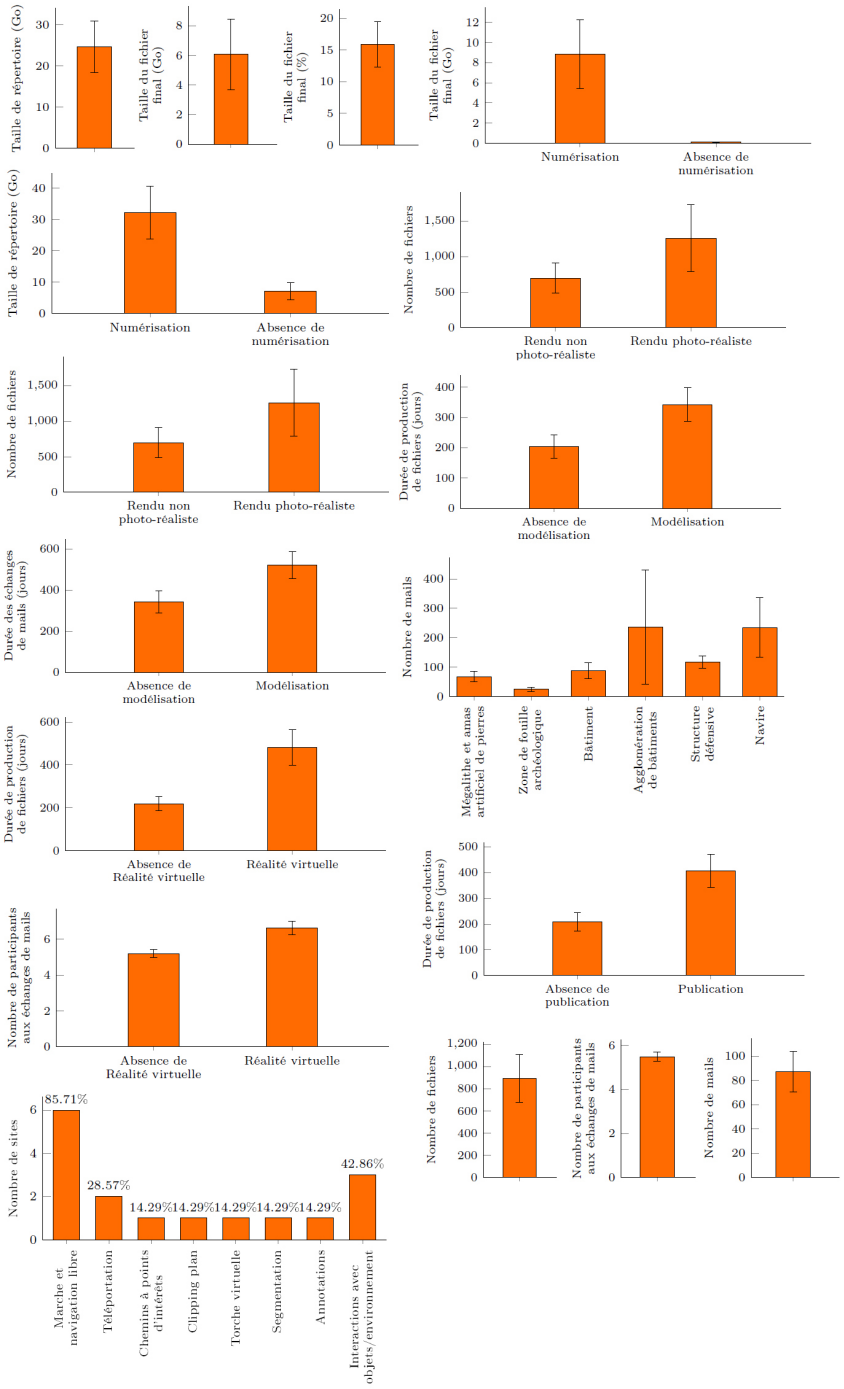


FIGURE 3.10 – Répartition des variables organisationnelles

à un niveau $n+1$ au sujet duquel il manque des informations. Le freiner peut paraître scientifiquement évident, mais le permettre crée des discussions méthodologiques chez l'archéologue.

Chapitre 4

Production d'environnements archéologiques 3D pour la recherche archéologique

Des considérations générales de production évoquées dans le chapitre précédent, nous visons à présent l'objectif d'extirper une "quintessence" pouvant nourrir de nouvelles réflexions scientifiques. Produire des environnements archéologiques 3D avec et pour la communauté scientifique implique en effet une décomposition méthodologique adaptable au large spectre des problématiques posées par les chercheurs. En prenant la dimension temporelle comme pivot et le savoir scientifique comme moteur, l'existant d'un site archéologique peut d'abord être numérisé, puis restitué à une ou plusieurs dates données et à différents niveaux d'incertitude. Les différentes analyses quantitatives et types de rendus, photoréalistes ou non, permettent à l'archéologue de construire de nouveaux raisonnements et de nouveaux savoirs. Après avoir catégorisé quelques numérisations 3D de l'existant (section 4.1), nous verrons comment celles-ci peuvent servir de base à des modélisations de l'hypothétique (section 4.2). Puis afin de prendre en compte les effets du temps, nous observerons des possibilités de comparaison des états, allant de la construction jusqu'au temps présent (section 4.3). En englobant tous ces aspects dans la notion d'environnement archéologique 3D, nous verrons enfin comment celui-ci peut mener à de l'analyse scientifique (section 4.4) (cf. figure 4.1).

4.1 Numérisation de l'existant

Plusieurs photogrammétries (sous-section 4.1.1) et lasergrammétries (sous-section 4.1.2) ont été utilisées dans le cadre de numérisations de l'existant de sites archéologiques du corpus du CNPAO. Le choix entre photogrammétrie et lasergrammétrie a complètement dépendu des contextes, mais quelques tendances se sont dégagées. Nous allons tenter ici de les illustrer. Des techniques d'imagerie traditionnellement médicales, comme la µ-tomodensitométrie (Safa et al., 2016), ont aussi été utilisées, mais comme indiqué précédemment, nous ne ferons ici qu'évoquer ce sujet (sous-section 4.1.3), suf-

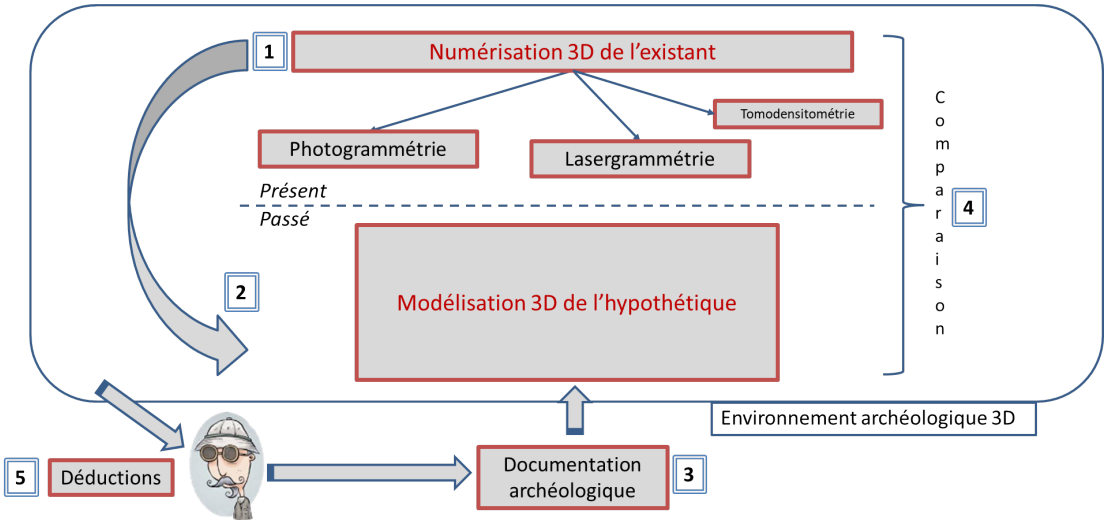


FIGURE 4.1 – Organisation schématique des thématiques développées dans le chapitre 4 "Production d'environnements archéologiques 3D pour la recherche archéologique"

fisamment consistant pour faire l'objet d'une autre thèse.

4.1.1 Photogrammétrie

La numérisation d'éléments archéologiques de petite taille s'effectue aisément et à faible coût par photogrammétrie. Cette technique a ainsi d'abord été utilisée sur de petits sites archéologiques et objets pour lesquels le temps de prise de photos et de traitement reste raisonnable. Pour chacun, l'objectif a été d'aider l'archéologue de l'acquisition 3D à répondre à quelques une de ses problématiques. Il est important de noter que la position du photographe par rapport à l'élément numérisé est homogène. Selon qu'il est situé à l'intérieur, à l'extérieur, ou parvenant à tourner autour et déplacer l'élément (objet), les contraintes sont en effet différentes.

4.1.1.1 Petits sites

Les premiers cas d'étude réalisés concernent des sites dont la superficie de la zone d'étude est relativement petite ($< 10m$ de long). Ne disposant pas à l'époque de scan laser, la chambre centrale du cairn de l'île Carn (archéologue responsable : Florian Cousseau) et le dolmen de Roh-Coh-Coët (archéologue responsable : Philippe Gouézin) ont ainsi été numérisés en photogrammétrie. Les méthodologies de prises de photos par les archéologues, dont le point commun est la maximalisation de la couverture des éléments, sont différentes et expérimentales, mais ont abouti à des résultats pertinents au sens où le niveau de précision des maillages a permis d'apporter des réponses à leurs questionnements. Le choix de ces sites s'est fait naturellement : l'étude mégalithisme breton est une thématique prédominante du laboratoire d'archéologie qui implique le CNPAO.

Pour numériser la chambre centrale du cairn de l'île Carn, une centaine de photographies ont été prises à l'intérieur avec un appareil photo reflex numérique *Canon EOS 400D*. Le but de l'opération consistait à assurer une couverture photographique complète, sans avoir trop de photos, en prenant en compte l'étroitesse de la chambre. Pour cela, l'archéologue-photographe s'est positionné systématiquement contre la paroi de la chambre et a pris les photos suivant des bandes circulaires allant de bas en haut et conservant une distance focale constante. L'obscurité inhérente à ce type de structure a également nécessité l'utilisation d'une diode électroluminescente blanche. Le logiciel *Photoscan v0.8.3*[1], qui permet d'automatiser les processus de traitements photogrammétriques, a alors exploité les photographies ensuite traitées à l'aide d'un serveur de calcul d'un laboratoire de géographie associé sur lequel était installé le logiciel. L'application a exécuté automatiquement trois étapes principales : alignement des photos, génération de maillage polygonal et texturage. Le modèle 3D de la chambre, calculé en quelques heures, se compose de 100 000 sommets et de 200 000 faces, et est généré dans le format OBJ pour faciliter l'intégration en réalité virtuelle (Gaugne et al., 2012). La figure 4.2 présente les résultats des vues du maillage.

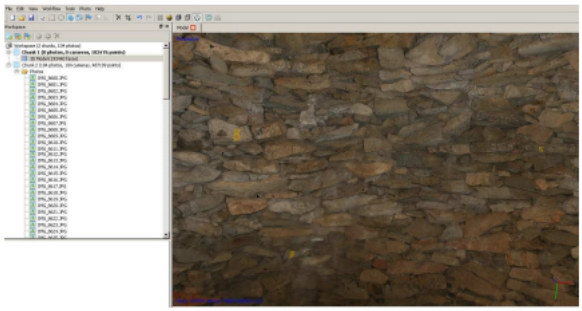


FIGURE 4.2 – Vue intérieure du maillage 3D de la chambre centrale du cairn de l'île Carn

Pour appréhender le phasage de construction du dolmen de Roh-Coh-Coët, il a été nécessaire de numériser le volume des roches le constituant. Un total de 880 photographies prises par un archéologue, et couvrant chaque pierre de l'édifice, ont généré un nuage de points et un maillage (cf figure 4.3), toujours au moyen du logiciel de photogrammétrie *Photoscan v0.8.3*, et ce durant quelques heures.

Un infographiste du CNPAO a ensuite importé, retravaillé et lissé le maillage dans 3DSMax (cf figure 4.4). De ce volume, le graphiste a isolé et modélisé les principales composantes de la structure en dessinant/complétant les parties cachées par des zones d'ombres (Barreau et al., 2013).

1. www.agisoft.com

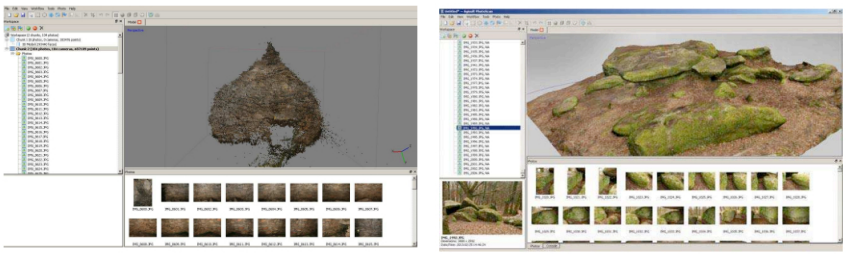


FIGURE 4.3 – Interface utilisateur de l'outil Photoscan (Agisoft) utilisé dans le cadre de la reconstruction 3D de la chambre centrale du cairn de l'île Carn et du dolmen de Roh-Coh-Coët par photogrammétrie

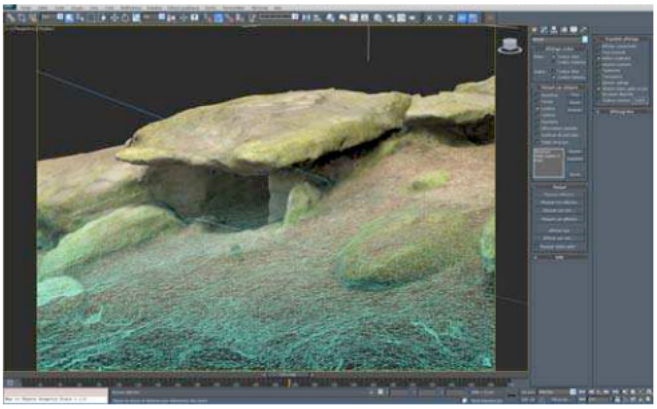


FIGURE 4.4 – Travail dans 3DS Max sur le maillage 3D issu de la numérisation du dolmen de Roh-Coh-Coët

4.1.1.2 Objets

La méthodologie utilisée pour l'étude de céramiques et présentée dans cette partie consiste en cinq étapes détaillées (cf figure 4.5) :

1. Prise de vue photographique suivant les positions décrites en figure 4.6.
2. Photogrammétrie.
3. Génération de maillage détaillé, mise à l'échelle et texturage de chaque fragment.
4. Extrapolation de formes 3D pleines correspondant aux contenu/contenant à partir des maillages des fragments en vue d'effectuer des mesures quantitatives.
5. Traitement de la forme "contenant" pour impression 3D.

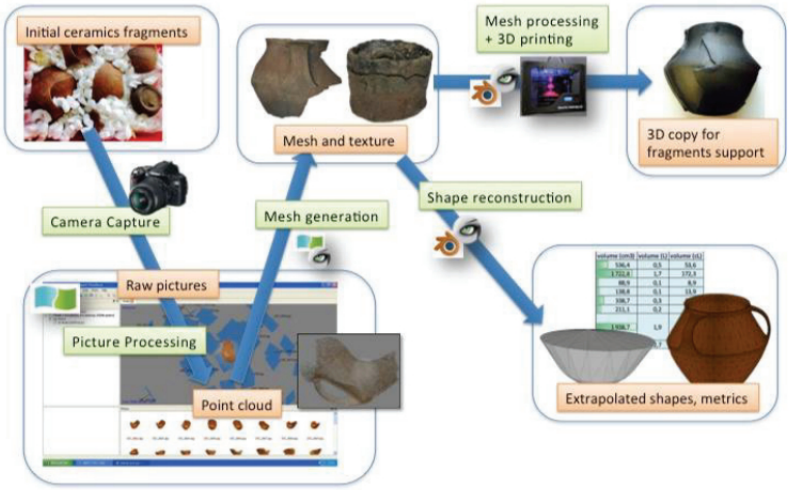


FIGURE 4.5 – Diagramme de processus

Dans ce contexte, l'impératif inhérent à la photogrammétrie est la photographie de l'objet sous un maximum d'angles possibles. Nous avons pris ainsi une première série de photographies, décrivant une hélice conique (cf figure 4.6), avec une distance *objectif de l'appareil - objet* la plus régulière possible. Ensuite, le tesson a été retourné à 180° et ce afin de compléter la série de photographies et obtenir ainsi une couverture photographique complète.

La mise à l'échelle peut s'effectuer directement dans le logiciel Photoscan, en plaçant des marqueurs à des distances connues. S'il les détecte, le logiciel peut alors générer une modélisation 3D à la bonne échelle. Cependant, cette fonctionnalité nécessite la mise en place d'une lumière uniforme, ce qui n'a pas été le cas dans notre installation. La mise à l'échelle a donc été effectuée ultérieurement dans le logiciel MeshLab à partir de distances connues entre 2 points (voir plus bas). Le *Key Point Limit* a été mis à 60000 au lieu de 40000 (par défaut). Ce nombre correspond au nombre maximum de points

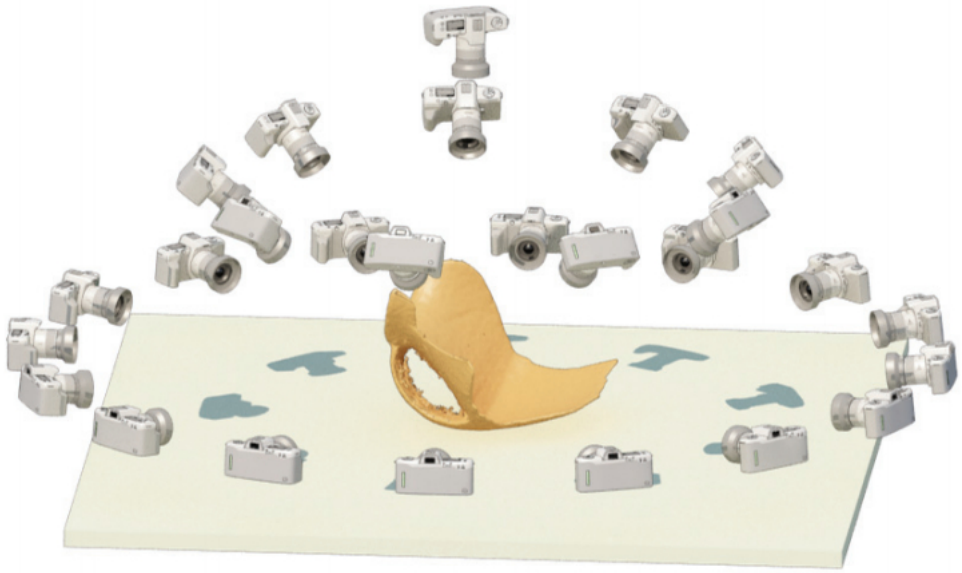


FIGURE 4.6 – Positions de l'appareil pour la prise de photos dans le cadre d'une photogrammétrie de tesson de céramique

extraits par le logiciel. Un *Key Point Limit* implique un nombre de points dans le nuage résultant plus important, mais un temps de calcul plus long. Le chiffre de 60000 correspondait aux besoins et à la machine utilisée. Le résultat est illustré figure 4.7.

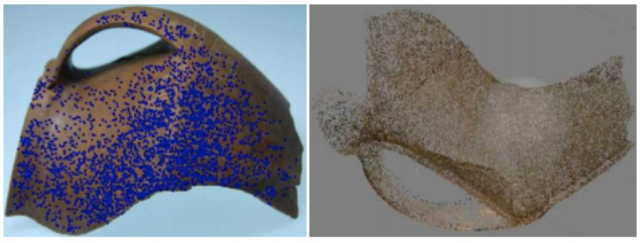


FIGURE 4.7 – Morceau d'une céramique avec points homologues (en bleu) générés par photogrammétrie / nuage de points résultant

Les options de génération de maillage et texturage ont été les suivantes :

- Surface type : Arbitrary
- Quality : High
- Number of expected surfaces : 250 000
- Mapping mode : Generic
- Fusion mode : Average

La couleur du maillage est calculée à partir des informations de couleurs contenues dans le nuage de points. Le logiciel génère la texture à partir de plusieurs séquences d'images extraites des photographies, et l'applique sur la surface du maillage (cf figure 4.8). Le maillage texturé obtenu a été exporté au format *.obj* et, comme indiqué précédemment, importé dans Meshlad pour effectuer la mise à l'échelle. Concrètement, une mesure de distance a été effectuée avec l'outil *Measuring Tool* entre deux points identifiés sur le tesson réel. Grâce à la fonction MeshLab *Transform : scale* (menu *Normals, Curvatures and Orientation*), les distances des axes X, Y et Z ont été enfin multipliées par le facteur déduit (Barreau et al., 2014d).

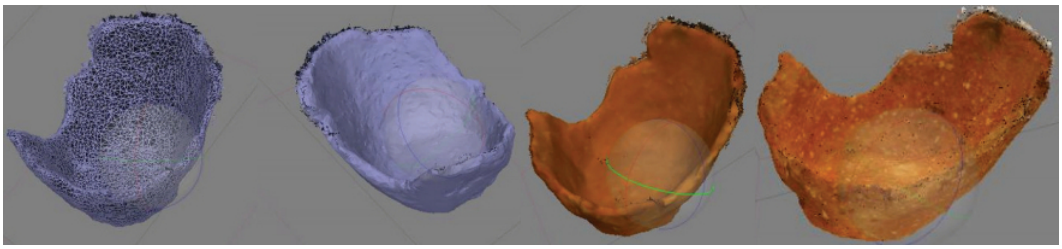


FIGURE 4.8 – Maillages bruts, lissés et texturés de tessons de céramique

4.1.2 Lasergrammétrie

Dès lors qu'un scanner laser a pu être utilisé (grâce à un partenariat de mutualisation avec un laboratoire de géosciences), l'obtention de nuages de points, suffisamment précis du point de vue spatial, a motivé son utilisation quasi systématique afin de produire des documents d'étude permettant différentes mesures.

Parmi les nombreuses numérisations au scanner laser effectuées dans le cadre du CNPAO, nous allons décrire celle de l'épave d'Erquy (archéologue responsable : Olivia Hulot) qui illustre un processus complet d'étude (Hulot et al., 2015) allant de l'acquisition à l'analyse en passant par la réalité virtuelle. Durant celle-ci, un ingénieur 3D du CNPAO a donc utilisé un scanner laser FARO Focus 3D X 330 associé à quatre cibles. Ce scanner laser a été conçu spécialement pour des utilisations extérieures, mais il est très sensible à la pluie et au vent. Ces facteurs météorologiques étant fréquents dans la région d'Erquy, l'ingénieur a multiplié les petites stations, moins risquées, afin d'assurer la couverture du site (épave et contexte géologique) avec la meilleure résolution possible. Sept stations ont ainsi été réalisées en une heure. Dans la figure 4.9, les sept positionnements du scanner sont présentés en violet et les positions des quatre cibles en vert. Après regroupement des sept stations via le logiciel SCENE (Balletti *et al.*, 2013), un nuage de 4 428 295 points a été obtenu. Le découpage de l'épave s'est effectué grâce au logiciel Cloudcompare et le nuage résultant comporte 1 252 371 points.

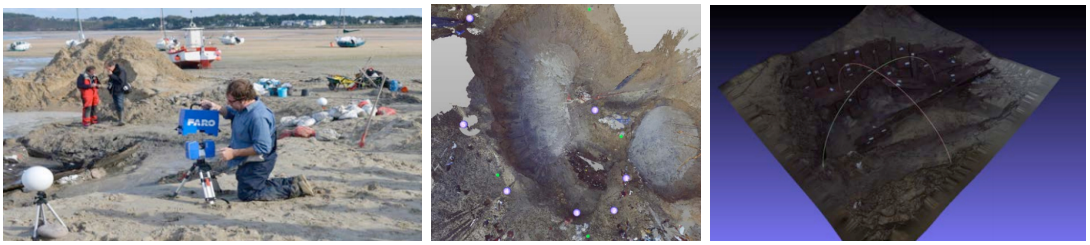


FIGURE 4.9 – Numérisation au scanner laser de l'épave d'Erquy, nuage de points, positions des cibles et maillage

4.1.3 µ-tomodensitométrie

Pour deux numérisations, il a été nécessaire de trouver une solution technique permettant d'obtenir un maillage plus précis que ceux obtenus par photogrammétrie. Dans le cadre du projet CNRS Imag'In IRMA [2], nous avons ainsi expérimenté l'utilisation de la µ-tomodensitométrie sur une flûte en os et sur une clavicule issue d'un squelette humain datant du Mésolithique. La machine utilisée a été le microfocus à rayons X "CT system General Electric v|tome|x 240D" du CRT Morlaix [3].

4.1.3.1 Reconstitution sonore

L'objectif a été de comparer les répliques d'une flûte en os, numérisées et imprimées en plastique et en résine, à une reproduction issue de l'artisanat ainsi qu'à l'originale. Les imprimantes utilisées ont été une Makerbot Replicator 2X (IUT Le Creusot) et une Stratasys Mojo (ENS Rennes). Pour obtenir un modèle 3D imprimable, la flûte a été scannée en trois parties afin d'obtenir une précision inférieure à 50µ puis le modèle a été nettoyé. Sans être identiques entre elles, il s'avère que les répliques imprimées en 3D sont globalement plus proches de l'original que celles fabriquées à la main, mais les sons produits ne sont pas encore totalement identiques (cf figure 4.10) (Safa et al., 2016).

4.1.3.2 Tracéologie

L'os humain le plus ancien de Bretagne est une clavicule trouvée sur le site de Beg-er-Vil à Quiberon et datée d'environ 8200 ans. Des marques de coupe sont clairement visibles à la surface des deux morceaux d'os qui peuvent être assemblés en un seul fragment d'environ 7cm. Nous avons participé à son étude grâce à un processus qui combine l'acquisition notamment par µ-tomodensitométrie, le traitement et l'impression 3D, dans le but de fournir un support pertinent aux archéologues impliqués. Les différentes coupes, leur angle d'attaque et l'observation générale d'une desquamation ont ainsi constitué les premiers objets de cette étude (cf figure 4.11).

2. http://www.cnrs.fr/mi/IMG/pdf/presentation_cnrs_irma_fev2016_shared.pdf
3. http://www.crt-morlaix.com/

FIGURE 4.10 – Flûte en os : modèle 3D issu d'une µ-tomodensitométrie en cours de nettoyage, originale à côté de ses répliques et diagramme représentant la proximité sonore de chaque réplique

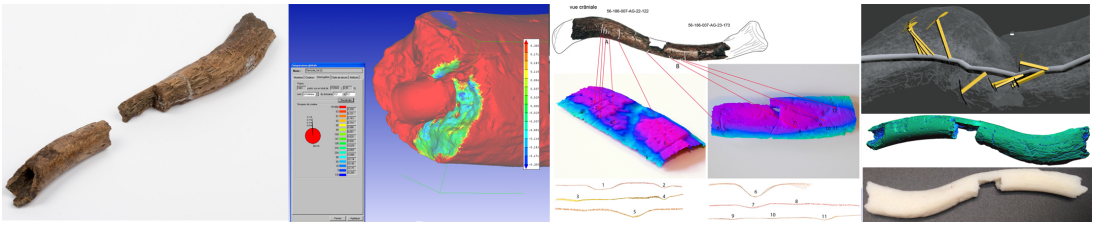


FIGURE 4.11 – Clavicule issue d'un squelette humain datant du Mésolithique : test de validité de contact des 2 morceaux numérisés par µ-tomodensitométrie, détection puis coupes de traces, angles d'attaque, visualisation de desquamation et impression 3D

4.2 Modélisation de l'hypothétique

Comme évoquées précédemment, plusieurs restitutions de l'hypothétique ont été effectuées dans le cadre du CNPAO. L'objectif de ce qui suit est d'illustrer au travers d'exemples les méthodologies utilisées selon que des vestiges, pouvant servir de base à la restitution, existent encore (sous-section 4.2.1) ou non (sous-section 4.2.2).

4.2.1 Apports de l'existant

Les premières restitutions ont ainsi eu pour sujet des châteaux, ou parties de ces châteaux, et une citadelle syrienne actuellement menacée par une situation de guerre. Du fait de leur solidité et de leur résistance à l'érosion du temps, ces restitutions ont reposé sur des vestiges existants plus ou moins conséquents. Nous évoquerons la porte des Champs du château d'Angers dans le département du Maine-et-Loire, (archéologue responsable : Daniel Prigent), le château de Coatfrec, dans le département des Côtes d'Armor (responsable archéologue Elen Esnault) et la Citadelle d'Alep.

À partir de photos et informations qualitatives et quantitatives fournies par l'archéologue référent, une première itération de restitution castellaire non texturée a donc pu être réalisée en quelques jours (cf figure 4.12). L'objectif scientifique étant d'obtenir un probable état de la porte des Champs du château d'Angers au XIII^{e} siècle (Barreau et al., 2013). À partir des volumes correspondant à l'existant de la porte des Champs, le travail a consisté à créer, éditer et supprimer différents éléments indiqués par l'archéologue. Ces éléments sont résumés dans le tableau 4.1 dont l'objectif est de rendre compte, d'un point de vue surtout qualitatif, du contenu des retours de l'archéologue et du travail induit.

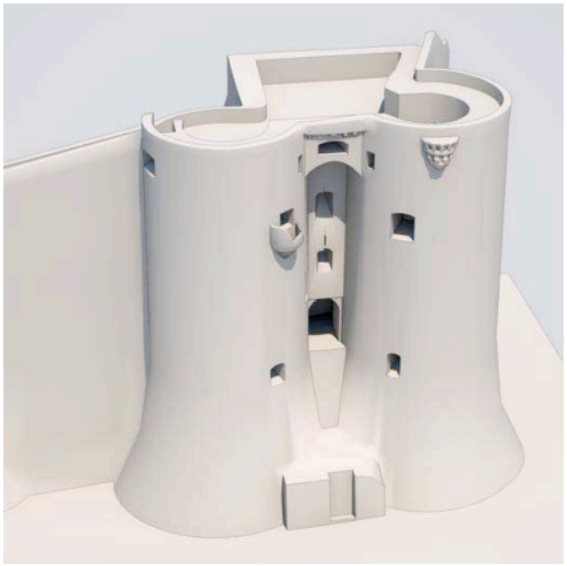


FIGURE 4.12 – Première itération de la restitution de la porte des Champs du château d'Angers au XIII^{e} siècle

TABLE 4.1 – Indications fournies par l'archéologue pour la restitution de la porte des Champs au XIII^{e} siècle

	Suppression	**Modification**	**Création**	**Texturage**
Tours	Miradors, canonnières, cadres autour des portes, parapets	Rehaussement		Roche avec design en relief irrégulier à la moitié des tours, motif gris beige pour les tours n°9-10, trois chaînages de calcaire au sommet
Archères				Texturées pour être larges de quelques centimètres avec cadres, des linteaux et fondations calcaires
Hourds			Constructions irrégulières en planches avec colonnes extérieures pour les tenir et ouvertures pour permettre la chute de projectiles	
Toit		Légèrement épaissi	Sorte de poinçon (partie verticale de l'axe du toit), poste de garde et cheminées	Texturé avec photos d'ardoises du XI^{e} siècle
Passerelles			Piles initialement de briques puis schiste, passages percés avec arches arrondies, balustrade avec bornes renforcées par morceaux de bois obliques	
Fossés			15m de large et 8m de profondeur, petit ruisseau entouré d'un peu de végétation	
Mur défensif			Mur défensif de la ville	Roche avec design en relief irrégulier à la moitié des tours

Le rendu de l'itération actuelle a été conçu en deux mois et demi après le début du projet. Il est également présenté aux visiteurs du château d'Angers (cf figure 4.13).

FIGURE 4.13 – Rendu de l'itération actuelle de la reconstitution 3D de la porte des Champs du château d'Angers au XIII^{e} siècle et support de présentation aux visiteurs du château

Concernant le château de Coatfrec, les vestiges sont beaucoup moins conséquents. Une numérisation par une entreprise allemande nous a fourni le nuage de points résultant. Avec celui-ci, quelques plans, croquis et discussions avec les archéologues, nous avons là aussi pu proposer une restitution (Barreau et al., 2014a). Là encore, le tableau 4.2 résume le détail des éléments principaux.

	Création	**Modification / prolongement déduit**
Section Nord	Porche formant un châtelet séparé, tourelle avec un escalier en colimaçon, grande tour carrée liée à un pont-levis, petite tour à l'arrière	Aile résidentielle occidentale
Section Sud		Deux tours, corps central (logis)
Section Ouest	Faîtage, tour d'escalier hexagonale	
Section Est	Courtine, mâchicoulis, parapets, trois latrines	
Toiture	Deux types de cheminées d'après châteaux de la région	
Modèle numérique de terrain	Maillage peu dense et vierge de toute végétation à partir d'un relevé topographique	

TABLE 4.2 – Indications fournies par l'archéologue pour la restitution du château de Coatfrec

Les textures étant plus homogènes, le travail de texturage a été beaucoup moins long que dans le cadre de la porte des Champs. Les rendus obtenus sont visibles dans la figure 4.14.

FIGURE 4.14 – Rendus 3D montrant les sections Nord et Ouest du château de Coatfrec

Enfin, il resterait encore suffisamment de vestiges pour constituer un modèle 3D de l'architecture initiale de la Citadelle d'Alep en Syrie. Cependant, la situation de guerre civile rend extrêmement difficile une numérisation "classique" par photogrammétrie ou lasergrammétrie. Partant de ce constat, nous avons expérimenté un procédé pour produire un modèle 3D "aussi pertinent que possible" uniquement à partir de quelques photographies touristiques. Ce processus combine modélisation 3D sur un nuage de points de mauvaise qualité et texture mapping à partir d'un corpus d'images disponibles sur internet (cf figure 4.15).

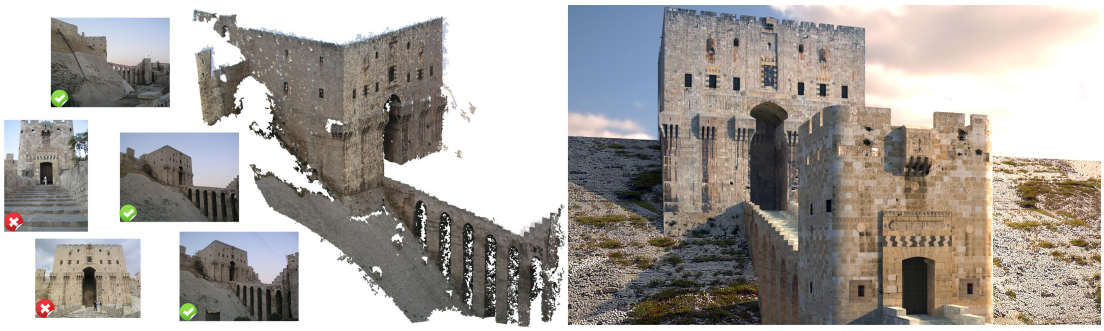


FIGURE 4.15 – Photos de la Citadelle d'Alep prises par un archéologue touriste, nuage de points de faible qualité et rendu final texturé du modèle 3D

4.2.2 Traitement de la documentation archéologique

Plusieurs travaux de reconstitution 3D ont concerné des environnements archéologiques pour lesquels l'existant ne permet que de faibles hypothèses. Il s'agit alors, en

plus des échanges avec l'archéologue, d'intégrer pleinement la documentation qu'il aura constituée et de suivre une approche descendante dans laquelle les itérations avec l'archéologue permettent de valider la compréhension de ladite documentation et d'affiner chaque élément de l'environnement. Les cas traités sont la salle à manger du donjon de Sainte-Suzanne (archéologue responsable : Pascal Trégan), le navire de la compagnie des Indes le Boullongne (historienne responsable : Sylviane Llinares) et l'habitation Loyola à Remire-Montjoly (archéologues responsables : Yannick Le Roux et Réginald Auger).

En ce qui concerne la salle à manger, ne subsistent que quelques encoches de poutre soutenant initialement son plancher. Après quelques décisions prises au sujet des positions de murs, sol et poutres, le travail le plus important a concerné l'ameublement, les décorations et l'éclairage. Le rendu (cf figure 4.16) a permis notamment de se rendre compte de l'obscurité de cette salle et de l'intérêt pour les résidents et convives d'utiliser les zones proches des fenêtres (Barreau et al., 2014b).

FIGURE 4.16 – Reconstitution 3D de la salle à manger du donjon de Sainte-Suzanne

Concernant la modélisation 3D du navire de la compagnie des Indes le Boullongne, elle s'est fondée sur des plans dessinés dans une monographie (Boudriot, 1983). De nombreux plans à l'échelle ont ainsi été numérisés et intégrés dans 3DsMax 2013, permettant à deux graphistes du CNPAO de modéliser les différents objets du navire et son gréement (cf figure 4.17).

Comme précédemment, les différents éléments modélisés par les graphistes peuvent être résumés en tableau (cf Table 4.3).

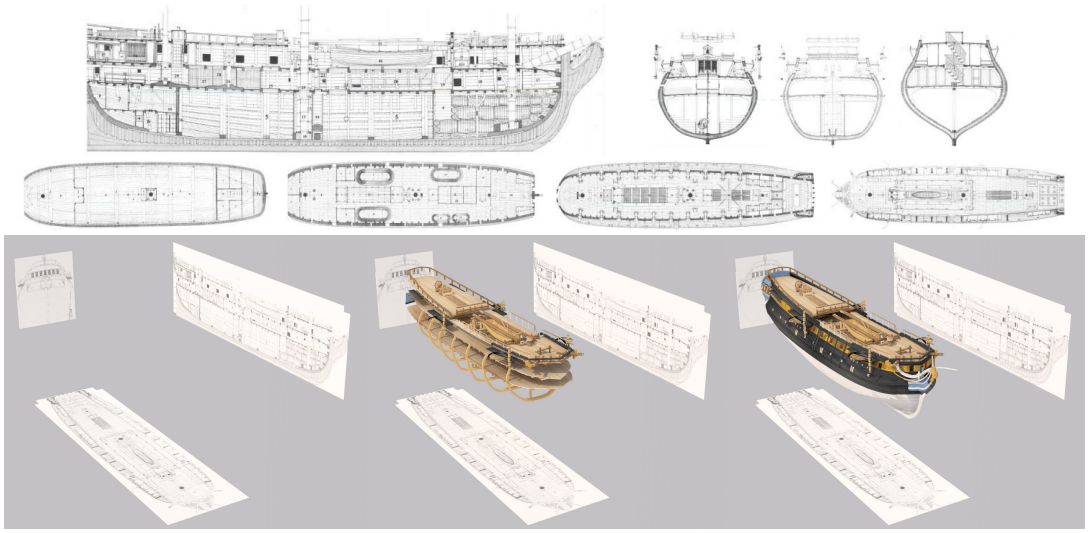


FIGURE 4.17 – Sections, plans et étapes de reconstitution 3D du Boullongne

TABLE 4.3 – Indications fournies par l'archéologue pour la restitution du navire de la compagnie des Indes le Boullongne

Coque		-coefficient d'allongement : 4,2 -étrave : 1/14 de la longueur totale -quête de l'étambot : 1/3 de l'élancement -tonture peu prononcée -rentrée des murailles : 1/8 de la largeur -deux paires de préceintes -grande lisse au niveau des passavants allant de l'étrave à la poupe -lisses de plat-bord partielles sur les gaillard d'avant et d'arrière -garde corps constitué de quelques montants et d'une lisse
Accastillage	***Avant***	-lion choisi comme figure de proue -grande distance sépare les jottereaux -grande herpe avec forte section en hauteur -absence de courbe de bossoir -absence de fronteau de poulaine

	Arrière	-gouvernail avec nombre de ferrures indiqué dans le devis du navire -façade simplifiée en raison de l'absence de galerie -absence de dunette -grande rocaille portant masquant partiellement la jaumière du gouvernail -châssis latéraux factices au-dessus des fenêtres de la grande chambre -façade "enfermée" dans un cintre en anse de panier, surmonté de montants et d'une lisse, et ornée de cordons de moulures et pilastres -fanal de poupe
	Ouvertures	-premier pont percé de chaque bord de trois sabords, dont les mantelets ont été abaissés, destinés à l'éclairage, la ventilation et au chargement -huit petits sabords éclairant et ventilant l'entre-pont -dalots, y compris ceux des pompes, indiqués sur les plans -sabords du second pont fermés par de faux mantelets -quatre petits châssis de fenêtre avec volets brisés pour les logements de l'état-major -présence à bâbord d'un grand sabord d'arcasse -deux sabords de retraite dans la voute d'arcasse -deux portes permettent d'accéder aux poulaines -absence de sabords de chasse
Constitution intérieure	***Cale***	-Cale à eau -Carlingue du mât de misaine -Coins de mât de misaine -Tambour d'accès de la cale à eau -Grande cale destinée à la cargaison -Soute aux poudres -Soute aux biscuits -Rechanges du maître canonnier -Tambour d'éclairage de la soute aux poudres -Couloir d'accès aux soutes aux biscuits -Écoutille d'accès aux poudres -Échelle d'accès aux biscuits et poudres -Archipompe -Puits aux boulets -Carlingue du grand mât -Double cloison séparant la grande cale, des poudres et biscuits

	1er pont	-Grande écoutille ou grand panneau -Échelle double de l'équipage (communication entre le premier et le deuxième pont) -Coins de grand mât -Écoutille dite de l'arrière -Mèche et carlingue du grand cabestan -Soute aux grains -Soute aux légumes secs -Échelle ou escalier de l'état-major -Carlingue du mât d'artimon -Sainte-Barbe -Chambre de l'écrivain, à bâbord, du maître canonnier à tribord -Cloison de la Sainte-Barbe -Ecoutillon du maître canonnier -Timon du gouvernail -Coins du mât d'artimon
	2e pont	-Écubiers -Grandes bittes -Porte d'accès aux poulaines -Cuisines en fer -Chaloupe, canot, yole -Montants du gaillard d'avant supportant le chapeau de la cloche -Potence de l'avant -Carlingue du petit cabestan

Gréement dormant, courant et voilure		-cordage : haubans, écoutes, drisses et bras -gréement dormant hors mâts : espars, potences, poulies, hunes, beaupré, bout-dehors -Voiles carrées -Voiles d'étais -Mât d'artimon Perroquet de fougue -Perruche -Ourse -Foc d'artimon -Voile d'étai de perroquet de fougue -Grand mât -Grande voile -Grand hunier -Grand perroquet -Pouillousse -Voile d'étai de grand hunier -Voile d'étai de grand perroquet -Mât de misaine -Misaine -Petit hunier -Petit perroquet -Civadière -Contre civadière -Petit foc -Grand foc -Clin foc

Ces éléments 3D sont d'abord issus de la lecture de la riche documentation faite par les graphistes, puis corrigés par l'historienne référente. Le modèle final est composé de 408 233 polygones et 224 570 sommets. Une vue éclatée du modèle final complet et un rendu final en contexte sont présentés figure 4.18. Ces éléments ont été texturés grâce à des données recueillies par l'historienne, mais la plupart des textures restent fortement hypothétiques (Barreau et al., 2015a).

Les documents fournis dans le cadre de la restitution 3D de l'habitation Loyola à Remire-Montjoly en Guyane française ont été très variés. Peu communs en métropole, la flore, les nombreux bâtiments et les éléments extérieurs à restituer ont nécessité un large spectre d'informations. Cette documentation se composait d'un livre très détaillé comportant des illustrations, des rapports de fouilles, des photographies et des vidéos réalisées sur site avec des tablettes. Des cartes de sites et de voies de communication, des relevés altitudinaux, des animations de rendus 3D de bâtiments similaires et un nuage de points à faible résolution du terrain issu d'une photogrammétrie aérienne ont été également fournis (Barreau et al., 2015b).

Les modèles 3D des bâtiments ont été positionnés et texturés de la même manière

FIGURE 4.18 – Vue éclatée du modèle 3D et rendu final du Boullongne

que celle décrite précédemment. Il s'agissait d'un atelier de forgeron, d'une maison de maître, d'une raffinerie de sucre, d'une chapelle, d'un hôpital, de terrasses, de petites maisons du quartier d'esclaves et d'un moulin à vent (cf figure 4.19).

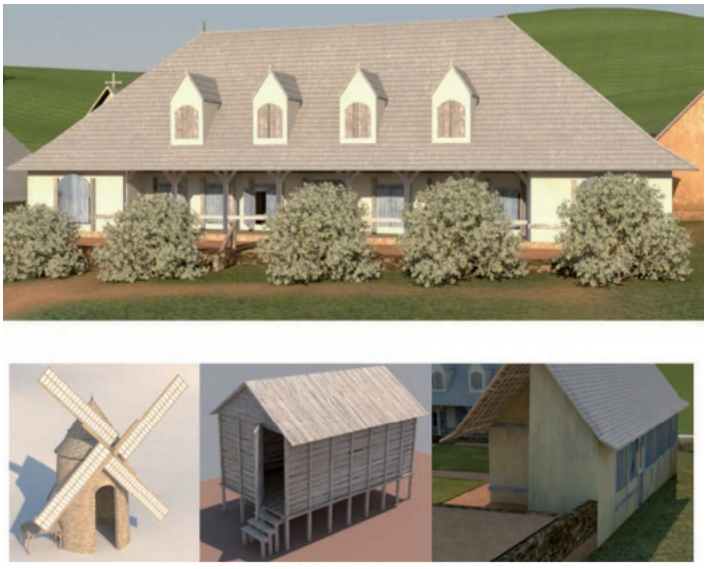


FIGURE 4.19 – Rendus 3D de la maison de maître, du moulin à vent, d'une maison d'un esclave et de l'arrière de la chapelle de l'habitation Loyola à Remire-Montjoly

4.3 Évolution temporelle

D'innombrables facteurs, naturels ou liés à l'activité humaine font évoluer un site archéologique de son établissement ou de sa construction jusqu'à nos jours. L'objectif

de cette partie est de réfléchir, avec l'exemple du château de Coatfrec, du dolmen de Roh-Coh-Coët, du donjon de Sainte-Suzanne et du château de Suscinio (archéologue responsable : Karine Vincent), à la manière d'intégrer l'impact de la dimension temporelle sur le processus de restitution et sur le raisonnement scientifique. Nous aborderons ainsi les notions de comparaison entre l'hypothétique et l'existant (sous-section 4.3.1), d'hypothèses de construction par les bâtisseurs du passé d'un environnement archéologique (sous-section 4.3.2) et de changements d'état (sous-section 4.3.3).

4.3.1 Comparaison entre l'hypothétique et l'existant

La production d'environnements mêlants hypothétique et existant amène des réflexions autour d'études comparatives. Avec l'exemple du château de Coatfrec, nous avons d'abord confronté deux méthodes visuelles. La première approche intuitive consiste à superposer le nuage de points (existant) sur la modélisation (hypothétique). Le problème de cette démarche est que le nuage de points peut couvrir certaines zones de la modélisation, et inversement (cf figure 4.20). La méthode de la distance de Hausdorff, proposée par le logiciel MeshLab (Cignoni *et al.*, 1998), permet de contourner ce problème en fournissant une modélisation texturée avec un dégradé de couleurs. C'est la texture qui porte alors l'information visuelle de comparaison (cf figure 4.20). Du point de vue théorique, l'utilisation de la distance de Hausdorff repose sur l'axiome suivant : la distance entre les deux maillages distincts n'est jamais nulle. Les modèles 3D de l'hypothétique et de l'existant sont ainsi clairement considérés comme asymptotiques, c'est-à-dire qu'ils tendent vers une réalité sans jamais l'atteindre. Si c'est évident pour l'hypothétique, les numérisations de l'existant présentent également des incertitudes liées aux moyens d'acquisition.

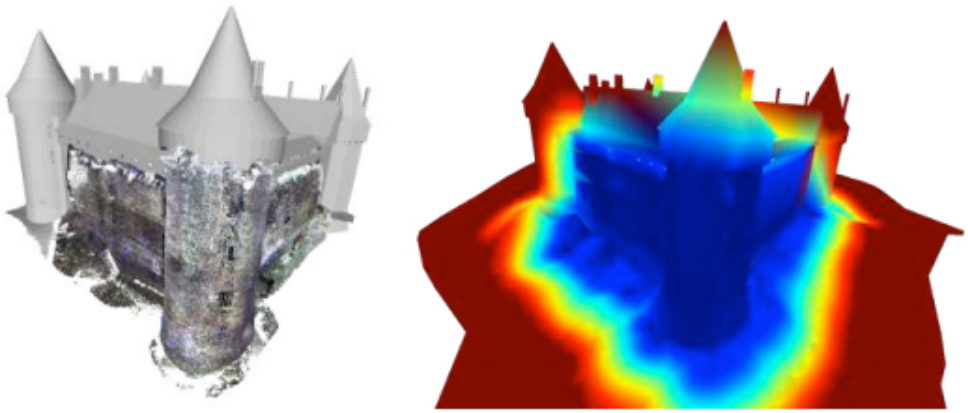


FIGURE 4.20 – Assemblage nuage/modélisation et modélisation texturée du château de Coatfrec avec dégradé de couleurs illustrant ses distances avec le nuage de points

Dans la démarche d'étude comparative, l'aspect quantitatif vient assez naturellement. Ainsi, la "différence" entre l'hypothétique et l'existant correspond à un volume, toujours hypothétique, des vestiges perdus, c'est à dire enfouis par la nature ou "réuti-

lisés" par l'homme. Ce volume de quantité de matière disparue peut correspondre à la somme des volumes des murs, toits et structures associées absents. Pour évaluer ce volume du château de Coatfrec, le nuage de points a d'abord été nettoyé et maillé par Poisson surface reconstruction (Kazhdan *et al.*, 2006). Les trous ont été bouchés sous 3DSmax et le volume évalué avec MeshLab (Compute Geometric Measures). Le résultat correspondant aux restes existants est de $3561.27m^3$. Afin d'obtenir un maillage correspondant uniquement aux parties hypothétiques, un algorithme a été établi. Celui-ci soustrait le nuage de points (existant) du maillage (hypothétique) en supprimant les points du maillage à l'intérieur du rayon du nuage. Il utilise la fonction radisuSearch de Point Cloud Library (PCL) qui recherche tous les voisins les plus proches d'un point dans un rayon donné. Une présentation simplifiée de l'algorithme a été établie :

Algorithm 1 Substract Point Cloud to Mesh

Require: $PC = \{x, y, z \in \mathbb{R}\}$ // Input Points Cloud to remove
  $M = (MP, MF)$ // Input Mesh
  $MP = \{x, y, z \in \mathbb{R}\}$ // Mesh points of M
  $MF = \{a, b, c \in MP\}$ // Mesh faces of M
  $Radius \in \mathbb{R} * +$ // Input Radius for search precision
Ensure: $Ptr = \{p \in MP\}$ // Points to remove
  //Find points to remove
  for each $P \in PC$ **do**
    $Ptr = Ptr \cup radiusSearch(kdtree(MP), P, Radius)$
  end for
  //Remove
  for each $F \in MF$ **do**
    for each $P \in F$ **do**
      if $P \in Ptr$ **then**
        $MF = MF - F$
      end if
    end for
  end for
  $MP = MP - Ptr$

Afin d'obtenir un maillage épais et fermé sans passer par une étape de modélisation supplémentaire, un modificateur "solidify" a été appliqué dans Blender avec une épaisseur correspondant à une moyenne des murs existants (cf figure 4.21). L'épaisseur pourrait être variable, mais nous ne disposions pas des informations sur celles des toits, charpentes, etc. Celles-ci pourraient cependant être estimées par des spécialistes, mais notre démarche a été plutôt méthodologique et nous nous sommes permis d'appliquer une seule épaisseur à tout l'édifice. Les polygones correspondant au terrain ont été également enlevés. Le volume obtenu, correspondant aux parties hypothétiques, est de $6686.23m^3$. Le ratio volumique entre les structures existantes et hypothétiques est de $\frac{3561.27}{3561.27+6686.23} = 34.8\%$. Il a également l'avantage de proposer une quantification de l'état de conservation (Barreau et al., 2014a).

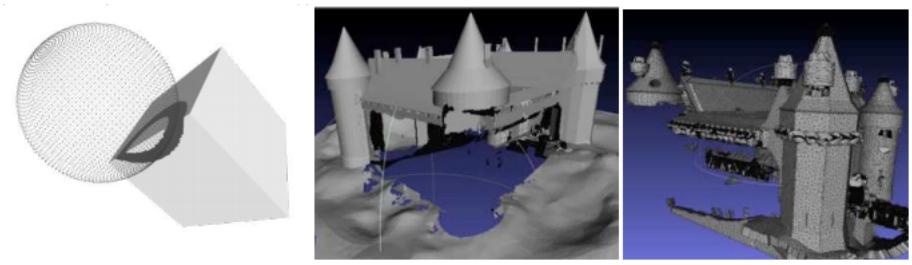


FIGURE 4.21 – Test de l'algorithme de soustraction hypothétique - existant

4.3.2 Construction d'un environnement archéologique

L'archéologie du bâti est une discipline dont un des objectifs est la compréhension de la construction bâtie. L'étude du travail des bâtisseurs est une science complexe et ne s'improvise pas. Il existe de nombreux exemples "sulfureux" dans lesquels la production 3D peut diluer des spéculations non prouvées (Kenyon, 2008). La restitution d'hypothèses de construction du dolmen de Roh-Coh-Coët, à partir de rochers naturels, nous a permis d'appréhender la question du temps de construction sur un exemple simple dont les incertitudes sont clairement bornées par des archéologues.

Une fois que les volumes des rochers ont été modélisés, l'archéologue nous a soumis un diagramme de phasage à partir duquel nous avons produit une animation 3D (cf figure 4.22). Celle-ci a d'abord permis de mettre en lumière plusieurs ambiguïtés résolues (ou non) ensuite par les archéologues. Des opérations telles que l'ajout d'une rotation d'un bloc ou la liaison entre une petite dalle initialement isolée et le monument ont ainsi pu être identifiées et validées (Barreau et al., 2013). Chaque mouvement virtuel de roches a surtout impliqué des questions, non résolues mais énoncées, de temps pris par les bâtisseurs pour les effectuer.

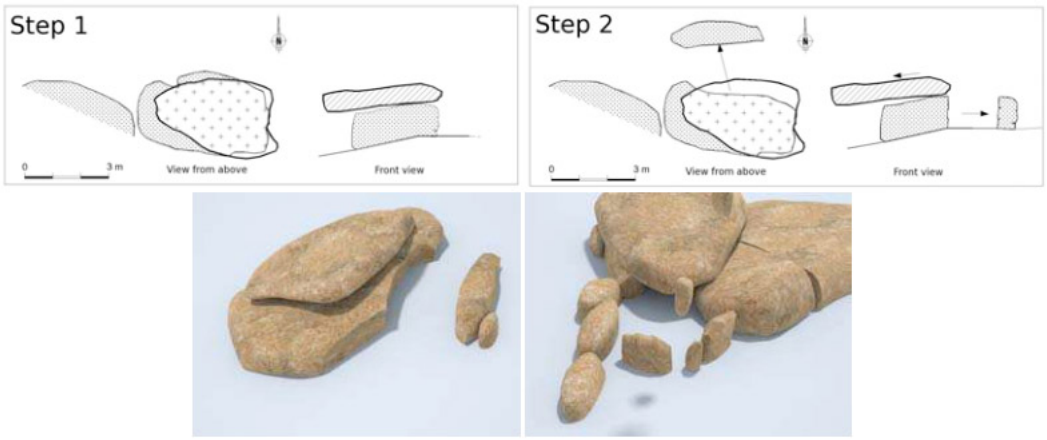


FIGURE 4.22 – Phasage 2D/3D de construction du dolmen de Roh-Coh-Coët

4.3.3 Changements d'état

Au cours de sa vie, l'environnement archéologique peut subir des transformations majeures. Ainsi parmi les productions 3D effectuées dans le cadre du CNPAO, certaines ont impliqué des changements d'état souhaités par l'archéologue. Leurs représentations nous ont permis d'observer qu'elles amènent des réflexions archéologiques majeures en terme d'étude d'évolution de mode de vie, techniques et événements historiques. Nous avons ainsi pu travailler sur des états hypothétiques, aux XI^{e} et XII^{e} siècles pour le donjon de Ste Suzanne (Barreau et al., 2014b), et aux XIII^{e}, XV^{e} et XVIII^{e} (révolution française) pour le château de Suscinio. Ces trois états du château de Suscinio ont été présentés au public devant les fouilles de l'été 2014 afin d'exposer l'état des connaissances et hypothèses (cf figure 4.23).

FIGURE 4.23 – Différents états hypothétiques aux XI^{e} et XII^{e} siècles du donjon de Ste Suzanne et aux XIII^{e}, XV^{e} et XVIII^{e} du château de Suscinio

4.4 Déductions scientifiques

Certains cas d'études ont été menés de bout en bout par des archéologues référents qui avaient des questions scientifiques assez abouties, et ce bien en amont des étapes de production 3D. Du test d'hypothèse de construction (sous-section 4.4.1) du dolmen

de Roh-Coh-Coët à l'étude quantitative (sous-section 4.4.2) de céramiques (archéologue responsable : Théophane Nicolas) en passant par la génération de plans de coupe précis de l'épave d'Erquy, nous évoquerons des exemples illustrant des avancés pour le raisonnement scientifique et menant à une réflexion autour de son cheminement.

4.4.1 Preuve de technique de construction

L'archéologue chargé de l'étude du dolmen de Roh-Coh-Coët avait besoin de vérifier quantitativement l'hypothèse suivante : les deux principales dalles du dolmen proviennent de la même roche qui a été taillée par les bâtisseurs du néolithique. Pour cela, nous avons importé le nuage de points issu de la photogrammétrie dans le logiciel Cloudcompare (Girardeau-Montaut, 2011). Les surfaces opposées des deux dalles ont été isolées avec l'outil de segmentation du logiciel. Pour superposer les surfaces, nous avons fait un premier alignement manuel avant d'utiliser l'outil d'alignement automatique qui implémente l'algorithme Iterative Closest Point (Chen et Medioni, 1992). L'outil "Cloud-to-Cloud Distance" a ensuite été utilisé afin d'obtenir une visualisation des différences. Pour chaque point d'un nuage 1, il mesure la distance du plus proche voisin sur le nuage 2. La figure 4.24 montre ainsi les zones de plus ou moins grande proximité entre les surfaces (Barreau et al., 2013). Cette image a fourni aux archéologues une base de discussion solide concernant les hypothèses et conditions de découpe de la dalle initiale. L'analyse leur a bien montré que le premier bloc, qui a été scindé, provient d'une dalle initiale. Cet argument alimente l'idée remarquable que le dolmen a essentiellement été construit à partir d'un seul affleurement de roche naturelle (Gouézin, 2015).

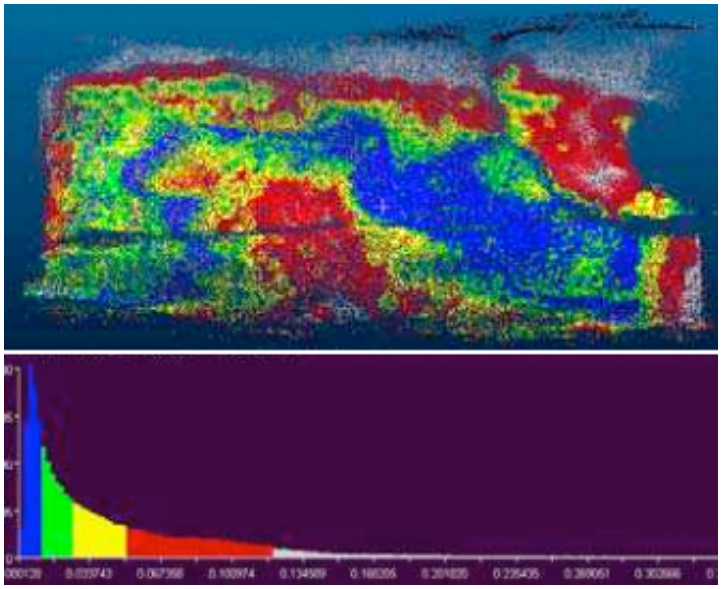


FIGURE 4.24 – Étude de coïncidence entre 2 rochers du dolmen de Roh-Coh-Coët montrant que les faces se correspondent exactement le long d'une fracture (Gouézin, 2015)

4.4.2 Études quantitatives

Dans le cadre de l'étude d'une première céramique de Rezé et après avoir supprimé les poignées, la fonction "Surface reconstruction : Poisson" (menu "Remeshing, Simplification and Reconstruction") de Meshlab a été utilisée pour extrapoler la forme initiale du contenu de la céramique (cf figure 4.25). Cette forme a été utilisée pour calculer, avec la fonction "compute geometric measures" du logiciel, le volume de la céramique (2742,9 cm^3).

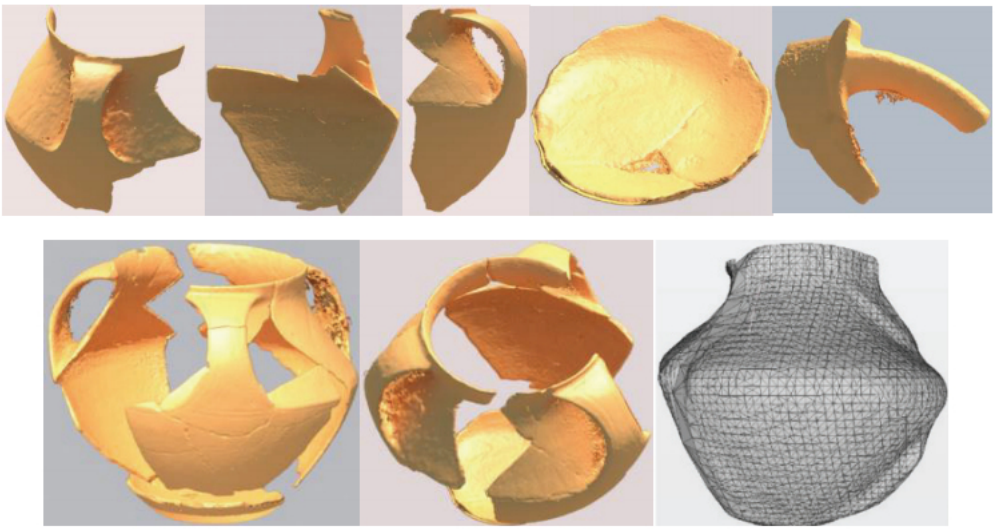


FIGURE 4.25 – Parties séparées / étape de reconstruction / reconstitution du contenu d'une céramique

Pour une autre évaluation du contenu d'une céramique, les fragments disponibles ne recouvraient qu'une petite partie du contenant. En prenant en compte la grande incertitude liée à la reconstitution du contenu, nous avons ainsi positionné les tessons dans Blender. En épousant la courbure sous-entendue par l'agencement de tessons, nous avons créé une série de cercles (cf figure 4.26) qui ont été importés dans le logiciel Meshlab. La fonction "convex hull" du logiciel, utilisant l'algorithme QHull (Barber *et al.*, 1996), a permis de créer un maillage à partir des différents cercles. Ce maillage, constituant une forme complètement fermée, a également été utilisé pour calculer son volume (Barreau et al., 2014d).

En archéologie, la coupe architecturale, qu'elle soit transversale ou longitudinale, constitue un outil indispensable à l'analyse de l'architecture. Pour l'épave d'Erquy, le nuage de points a été découpé dans le logiciel CloudCompare afin de fournir à l'archéologue des images 2D constituant des coupes. Celles-ci ont été comparées à un relevé manuel, chronophage et nécessitant de la dextérité, et par photogrammétrie (cf figure 4.27). Sur ce cas d'étude, la photogrammétrie (effectuée par un prestataire extérieur) n'a pas permis de relever pleinement les objets possédant deux faces dans le plan vertical. Les lacunes du relevé laser ont concerné les zones submergées, mais celui-ci a permis

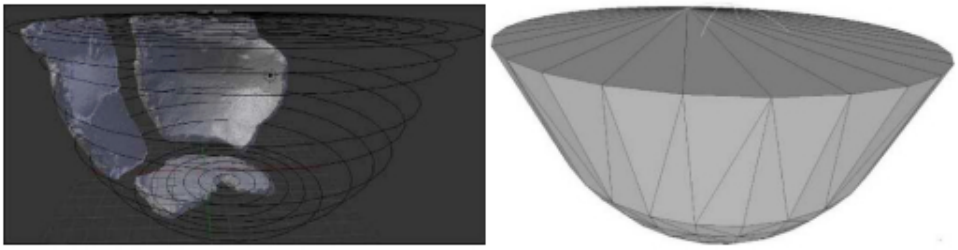


FIGURE 4.26 – Alignement des tessons de céramique et volume du contenu déduit

une finesse de mesure et la couverture de la totalité de l'espace concerné par la fouille (Hulot et al., 2015).

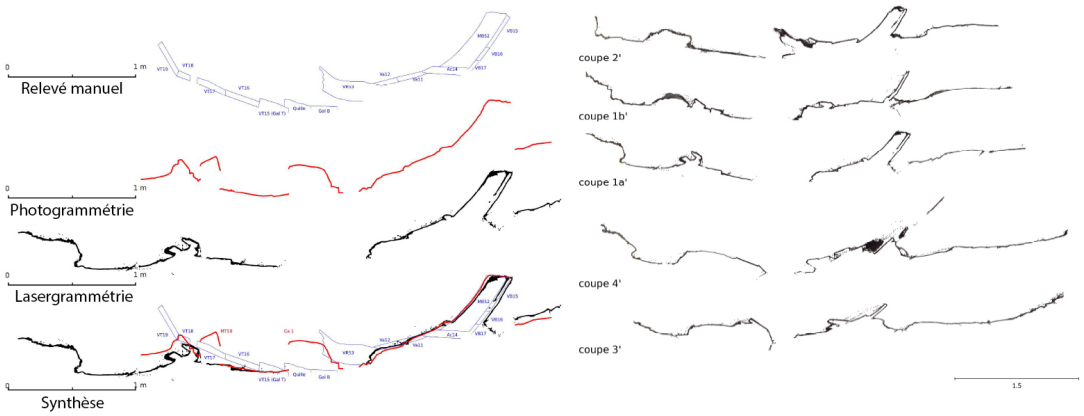


FIGURE 4.27 – Plans de coupe de l'épave d'Erquy

4.5 De la sérendipité à l'heuristique

Depuis l'avènement des TIC, le terme de "sérendipité systématique" (Smith, 1964) est souvent utilisé pour évoquer un chercheur d'information (scientifique (Garfield, 2004) ou internaute) qui découvre de la connaissance à partir de l'outil informatique. Sur internet par exemple, le chercheur d'information navigue parfois en se perdant au sein des liens hypertextes pour trouver, au hasard d'une page, une information lui étant utile alors même qu'il ne savait pas qu'il la cherchait vraiment.

En ayant l'archéologue "à portée de main" muni de ses connaissances et pouvant explorer les modèles 3D de l'existant ou de l'hypothétique, et ce par le biais de différents points de vue ou éclairages (Mens et al., 2016) impossibles ou difficiles à réaliser dans la réalité, l'envie de provoquer une sérendipité systématique vient assez naturellement. Cependant, les expériences d'exploration menées à ce stade sont parfois tombées dans l'écueil de la "flânerie ludique". Afin d'optimiser l'heuristique menée par l'expert archéologue, l'idée développée dans la suite de cette thèse a ainsi été d'explorer l'utilisation

de méthodes d'interactions et de simulations immersives en réalité virtuelle.

Chapitre 5

Méthodes d'interactions et de simulations immersives pour l'archéologie

Malgré les apports d'une production menée avec et pour les archéologues énoncés dans le chapitre précédent, il subsiste des manques liés au contrôle des hypothèses et des incertitudes. Il est en effet important à ce stade de rester lucide sur le fait que ces productions 3D correspondent majoritairement à un niveau que l'on peut qualifier au mieux d'expertise et au pire d'opinion. Désormais pour reprendre la suite logique évoquée entre les deux premiers chapitres de ce manuscrit, l'enjeu est de concevoir des outils de réalité virtuelle pouvant proposer un chemin vers la preuve, voire le consensus scientifique. Les méthodes et outils décrits dans cette partie visent à vérifier comment les possibilités de navigation (section 5.1.1), d'interaction avec objet (section 5.1.2) et de simulation (section 5.2) peuvent amener des archéologues à la construction, l'analyse et la valorisation (section 5.3) d'une reconstitution la plus pertinente possible (cf. figure 5.1).

5.1 Interactions à l'échelle 1:1

Nous évoquerons dans cette partie des outils développés permettant la navigation et l'interaction avec des objets d'environnements archéologiques virtuels à l'échelle 1:1. Concernant d'abord le choix de travailler à l'échelle 1:1, celui-ci doit être perçu comme point de départ à la concrétisation de futures logiques multiéchelles. Celles-ci sont déjà abordées depuis plusieurs années (Lock et Molyneaux, 2006) par la communauté des archéologues qui, avec l'émergence des systèmes d'information géographique, passent de l'interprétation à l'échelle de l'individu (à un endroit et à un moment précis), à la dynamique complexe des groupes culturels s'étendant sur le temps et l'espace.

Il est aussi important à ce stade d'appuyer le fait que nous considérons bien la navigation comme niveau d'interaction défini par Bowman (Bowman, 1999). Cependant, une des méthodes de navigation décrite dans la suite implique également le niveau

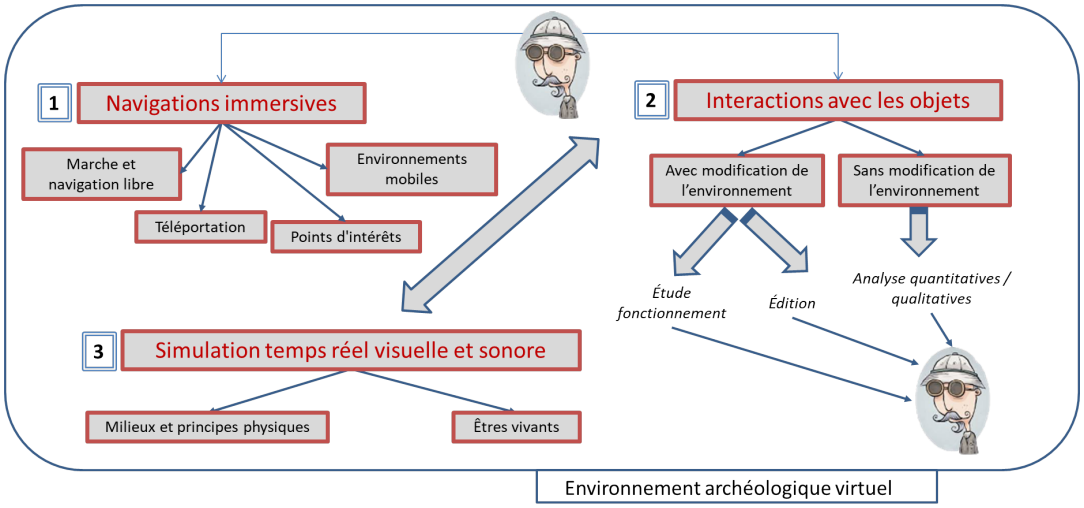


FIGURE 5.1 – Organisation schématique des thématiques développées dans le chapitre 4 "Méthodes d'interactions et de simulations immersives pour l'archéologie"

"sélection" de Bowman. De plus, nous souhaitons notamment souligner les éventuelles conséquences des interactions sur l'environnement archéologique virtuel.

Ainsi, le découpage de cette partie va suivre une hiérarchie mêlant des catégories et types d'interactions, sous-entendant la taxonomie de Bowman, mais plutôt destinés à l'archéologue dont les intérêts sont principalement les impacts sur l'environnement archéologique virtuel (cf. figure 5.2).

Nous exposerons dans un premier temps plusieurs types de navigations immersives (sous-section 5.1.1), pour ensuite traiter des interactions avec objets ayant des conséquences durables ou non sur l'environnement archéologique 3D (sous-section 5.1.2). À ce niveau, nous réfléchirons à comment l'utilisateur expert, directement immergé dans l'environnement archéologique virtuel, peut réaliser des études de fonctionnement, de l'édition et diverses analyses.

5.1.1 Navigations dans l'environnement archéologique virtuel

Les intégrations de différents sites du corpus du CNPAO au sein de la plateforme Immersia ont entraîné tout d'abord des réflexions autour des modes de navigation. Les sites étant bien hétérogènes, notamment au niveau de leurs dimensions, plusieurs modes ont été implémentés. Sur l'exemple de sept sites intégrés, nous présenterons plusieurs modes adaptés à ces environnements archéologiques virtuels.

5.1.1.1 Marche et navigation libre

La première intégration d'environnement archéologique 3d au sein de la plateforme Immersia fut celle du cairn de l'île Carn. Les premiers retours des archéologues furent la bonne qualité de sensation d'immersion et de rendu. La grande taille de la plate-

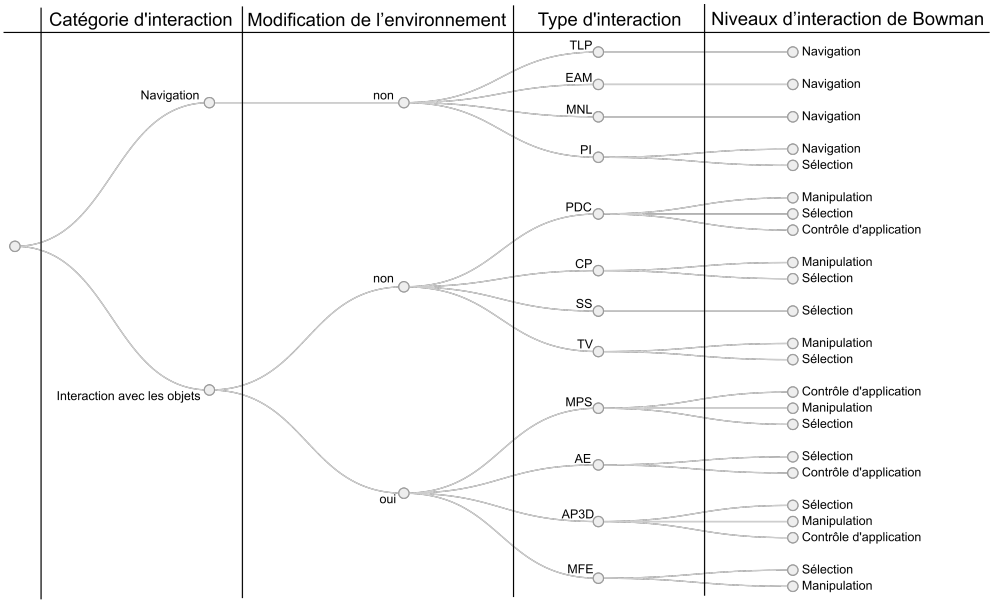


FIGURE 5.2 – Interactions proposées pour l'archéologie : catégories, impacts, types et niveaux de Bowman (Bowman, 1999)

forme permet une vision périphérique complète et rapide de la structure architecturale du cairn. La possibilité de navigation naturelle en (X,Y) et de lévitation au Flystick permet de se déplacer facilement partout dans le cairn, aux dimensions du même ordre que celles de la plateforme, et de bien observer des parties intéressantes telles que des peintures, pierres de couleur, fentes, etc. Outre la lévitation, cette navigation en (X,Y) reste impossible dans la réalité en raison de l'exiguïté d'accès et de la dangerosité du site (Gaugne et al., 2012) (cf figure 5.3).

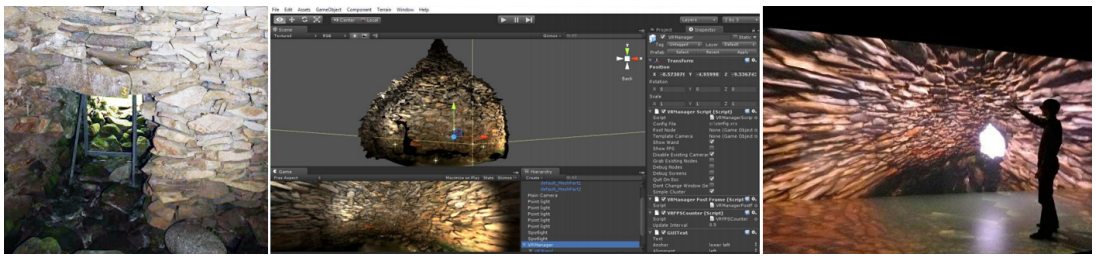


FIGURE 5.3 – Accès difficile, intégration de la restitution 3D et exploration immersive du cairn de l'île Carn

Pour la navigation libre dans le temple du Haut Bécherel de Corseul (archéologue responsable : Alain Provost), une adaptation pour souris 3D a été réalisée afin de permettre plus de possibilités qu'avec le Flystick. L'axe gauche/droite autorise une translation perpendiculaire à la direction de l'utilisateur. Les axes de rotation de la souris

3D permettent également une rotation de la caméra. Plusieurs séances de travail sur la plateforme de réalité virtuelle *Immersia*, avec l'archéologue responsable du site, et des experts des monuments de l'Antiquité ont donné lieu à des amendements (forme des colonnes, taille et matériau de la statue de Mars, pigments sur les colonnes) pour converger vers une reconstitution cohérente du temple. Ces séances ont notamment donné lieu à des échanges entre les experts sur le rôle fonctionnel des différentes parties du temple (Barreau et al., 2014c).

De la même manière, la navigation libre a été testée sur trois autres environnements archéologiques : l'épave d'Erquy (Hulot et al., 2015), la plantation sucrière de Rémire (Barreau et al., 2015b) et la chapelle de Languidou (cf figure 5.4).

FIGURE 5.4 – Navigation libre au sein de l'épave d'Erquy, de la chapelle de Languidou et de la plantation sucrière de Rémire

5.1.1.2 Téléportation

La restitution 3D de la villa de Bourg Saint-Père (archéologue responsable : Gaétan Le Cloirec) a été réalisée avant le démarrage du CNPAO. Son intégration a cependant entraîné une réflexion autour de la navigation en son sein. Contrairement au cairn de l'île Carn, le site est bien plus vaste que les $30m^2$ d'écrans situés au sol de la plateforme Immersia. Ainsi en plus de la navigation naturelle et du déplacement au Flystick, un ensemble de points d'intérêt a été défini dans l'environnement virtuel pour que l'utilisateur puisse s'y téléporter par pression d'un bouton sur le Flystick (cf figure 5.5). À ce stade, il est clair que l'étendue de l'environnement archéologique implique une réelle variété de modes de navigation, et ce pour assurer une exploitation efficace.

5.1.1.3 Points d'intérêt

Lorsqu'un environnement archéologique, comme le temple du Haut-Bécherel, présente des zones d'intérêt à l'intérieur de bâtiments ou cachées, il peut être intéressant de

FIGURE 5.5 – Dispositions et exploration de la villa du Bourg Saint-Père

guider l'utilisateur vers celles-ci. Ainsi, nous avons aussi développé une navigation par points d'intérêt, établis au préalable dans l'application Unity (cf figure 5.6). Lorsque l'utilisateur appuie sur un bouton du Flystick ou de la souris 3D, un chemin vers le prochain point d'intérêt est calculé et affiché à partir sa position actuelle grâce à la fonction de Pathfinding de *Unity* (Hu *et al.*, 2012). L'utilisateur se déplace alors automatiquement le long du trajet calculé à la vitesse de marche. Lorsque le point d'intérêt est atteint, le déplacement s'arrête. Durant celui-ci, l'utilisateur peut passer au mode de navigation libre toujours par pression de bouton (Barreau et al., 2014b).

FIGURE 5.6 – Restitution 3D intégrée dans Immersia et navigation par points d'intérêts dans le temple du Haut Bécherel

5.1.1.4 Environnements archéologiques mobiles

Le Boullongne pouvant se déplacer sur des mers virtuelles, son exploration a impliqué quelques adaptations de modes de navigations sus-cités (cf figure 5.7). Lorsque l'utilisateur est sur le bateau (par défaut), son noeud dans le graphe de scène de Unity est dépendant de celui du bateau. Il est également soumis à une force de gravité. Ainsi il s'agit de placer des collisionneurs sur chaque pont afin que l'utilisateur ne passe pas systématiquement à travers. D'autres ont aussi été placés sur les rails et la coque pour le même type de raisons. Une navigation dénuée de contraintes physiques et une possibilité de téléportation à des positions clés sur le navire et sur des îles sont également disponibles. Plus généralement, lorsque l'utilisateur est hors du navire, son noeud devient indépendant de celui du bateau (Barreau et al., 2015a).

FIGURE 5.7 – Exploration du Boullongne

5.1.2 Interaction avec les objets de l'environnement archéologique virtuel

L'implémentation des interactions avec les objets de l'environnement archéologique virtuel s'inscrit dans la suite logique des interactions liées à la navigation. L'idée est de permettre à l'utilisateur de manipuler des outils qui vont avoir un impact provisoire ou non sur les éléments de l'environnement. En effet, nous distinguerons deux types d'interactions avec ses objets :

- Sans modification : les interactions vont agir temporairement sur l'environnement afin de permettre à l'utilisateur de le segmenter, l'éclairer différemment et plus généralement l'analyser.
- Avec modification : les interactions vont permettre d'annoter l'environnement, faire fonctionner certains éléments et modifier des paramètres de simulation (décrits plus loin). L'annotation a vocation à critiquer ou proposer un enrichissement de l'environnement dans une logique de communication avec des infographistes et d'autres archéologues. Le fonctionnement d'éléments et la modification de paramètres de simulation visent là encore d'autres formes d'analyse.

5.1.2.1 Sans modification de l'environnement

Clipping plan Le *clipping plan* implémenté dans Immersia permet de masquer une partie de l'environnement virtuel grâce à un plan interactif et manipulable par Flystick (cf figure 5.8). L'objectif est de focaliser l'attention sur des parties spécifiques (Gaugne et al., 2012). La manipulation de ce *clipping plan* peut s'effectuer à plusieurs dans le cadre d'un contexte collaboratif.

Plan de coupe Même s'ils concernent tous les deux des manipulations 3D en réalité virtuelle, il est important de noter que nous dissocions le *clipping plan* de la notion de plan de coupe, évoqué précédemment en document 2D présentant des contours (Hulot et al., 2015). Une implémentation d'édition de plan de coupe a ainsi été réalisée sur le nuage de points de la chapelle de Languidou (cf figure 5.9). Cette édition s'effectue actuellement au Flystick mais cette méthode semble poser des problèmes de précision. Un positionnement "chirurgical" de 3 points définissant le plan par l'utilisateur semble une solution plus pertinente et est actuellement en cours d'élaboration.

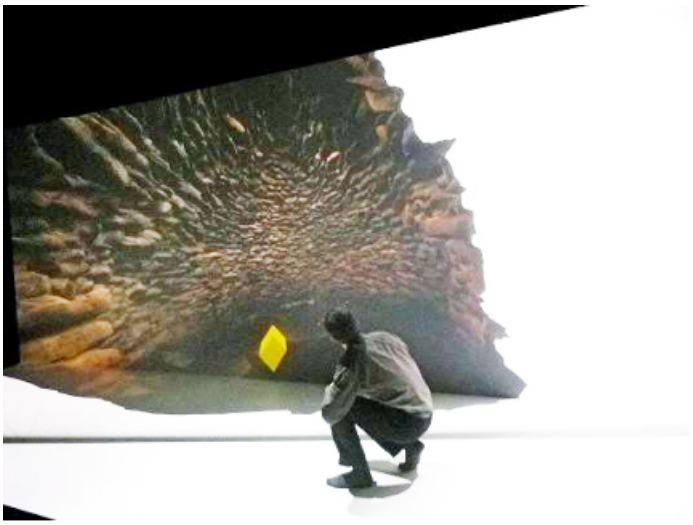


FIGURE 5.8 – Utilisation du *clipping plan* dans le cairn de l'île Carn

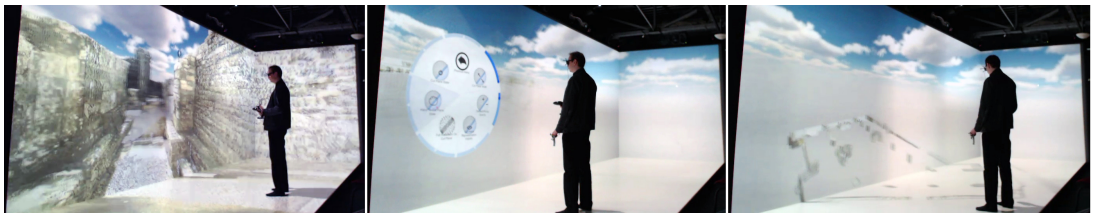


FIGURE 5.9 – Édition d'un plan de coupe de la chapelle de Languidou

Torche virtuelle De la même manière, un outil de torche virtuelle, manipulable par Flystick, a été développé (cf figure 5.10). Il s'agit également de permettre à l'utilisateur de se concentrer sur une zone en particulier (Barreau et al., 2014b). À la différence du clipping plan, le reste de l'environnement est obscurci, mais reste appréhendable. Par le biais de mouvements de la source de lumière, l'utilisateur peut ainsi étudier des reliefs de surfaces gravés sous différents angles et plus généralement l'interprétation d'ombres.

FIGURE 5.10 – Utilisation d'une torche virtuelle dans le cairn de l'île Carn

Sélection de segmentations Il peut arriver qu'une segmentation de l'environnement archéologique puisse apporter un intérêt en termes de lecture et de compréhension scientifique. Ainsi toujours à l'aide de l'exemple du cairn de l'île Carn, un découpage relativement précis a été réalisé par un graphiste du CNPAO et ce en respectant les différentes couches correspondant aux étapes de construction de cairn (cf figure 5.11). L'intérêt de l'interaction en réalité virtuelle est de pouvoir afficher successivement ces étapes afin de pouvoir réfléchir, à l'échelle 1:1, aux techniques de construction associées (Barreau et al., 2014b). Même s'il est nécessaire de pousser l'étude auprès de plus d'utilisateurs, il est apparu que le sens proprioceptif de l'archéologue, immergé à telle ou telle étape de construction, lui permet de se rendre notamment compte d'aspects liés aux positions des échafaudages et plus généralement à l'étaiement (maintien provisoire des pierres).

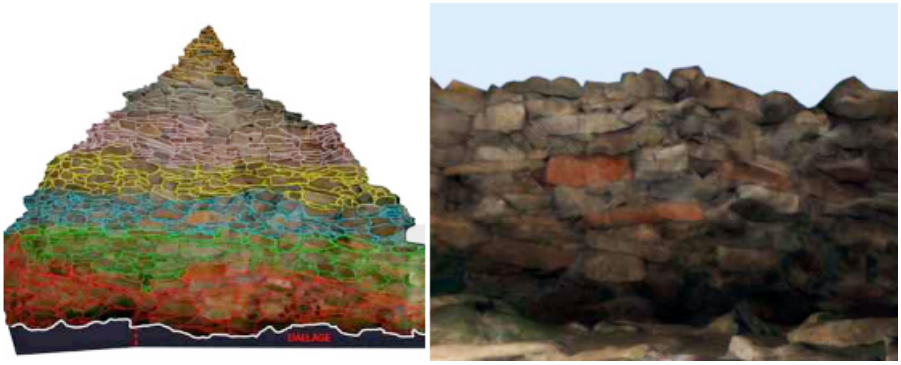


FIGURE 5.11 – Visualisation des étapes de construction du cairn de l'île Carn

5.1.2.2 Avec modification de l'environnement

Annotation épinglée La possibilité d'annotation constitue une méthode intéressante de fixation des idées échangées durant une session d'immersion. Nous avons ainsi mis en oeuvre un outil d'enrichissement de l'environnement archéologique virtuel par le biais d'annotations symboliques (cf figure 5.12). L'objectif étant de se concentrer sur les interactions avec l'environnement, les étiquettes textuelles et graphiques ont été définies au préalable et stockées dans un fichier simple. Les outils précis d'édition de ces annotations devraient en effet faire l'objet d'autres implémentations non réalisées ici. Pour "épingler" une annotation sur l'environnement, l'utilisateur désigne sa cible à l'aide d'un pointeur virtuel, puis appuie sur un bouton du Flystick pour valider. Une fois l'annotation saisie, ses coordonnées sont sauvegardées dans un fichier et restent visibles à l'utilisateur, quelle que soit sa position (Barreau et al., 2014b).

FIGURE 5.12 – Annotation symbolique dans le cairn de l'île Carn

Annotation par primitive 3D Pour certains éléments restituables, il peut être intéressant pour l'archéologue de pouvoir indiquer des informations plus précisément qu'avec un point désignant un emplacement. Sans aller jusqu'à de la sculpture virtuelle nécessitant des compétences et du temps, nous avons pensé que la possibilité de créer des primitives 3D accompagnées de métadonnées permettrait de fixer un certain nombre d'informations spatiales et typologiques, et ainsi de sécuriser et optimiser le processus de production d'éléments 3D. Une implémentation de ce type d'annotation est en cours (cf figure 5.13).

Mise en fonctionnement d'un élément Action quasi unitaire de toute utilisation de bâtiment, l'ouverture de porte d'un environnement archéologique virtuel permet à l'utilisateur une première appréhension immersive des contraintes de circulation, d'intimité, etc. Dans la restitution de la sucrerie jésuite, l'utilisateur peut ouvrir des portes, grâce à une pression de bouton sur le Flystick (cf figure 5.14) (Barreau et al., 2015b).

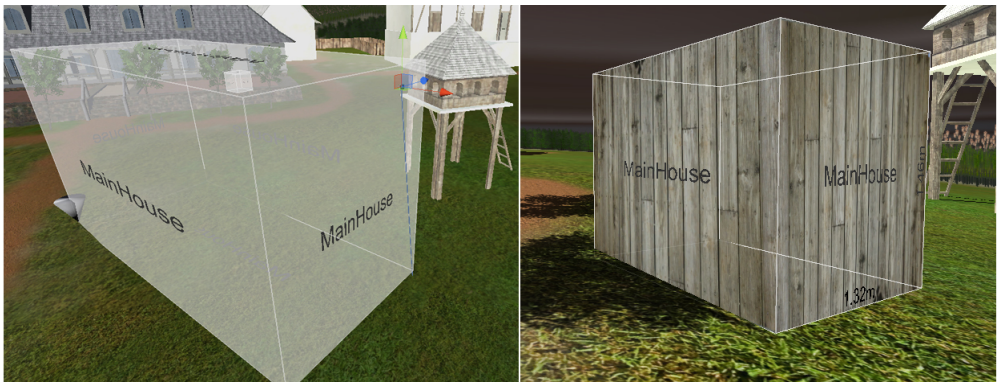


FIGURE 5.13 – Annotation par primitive 3D avec métadonnée dans la sucrerie jésuite

FIGURE 5.14 – Ouverture de porte sur le site de la sucrerie jésuite

Sur le Boullongne virtuel, les éléments pouvant impliquer une interaction sont plus nombreux et variés. Nous avons d'abord pu travailler sur ceux ayant un impact direct sur le déplacement du navire, qui se meut grâce à deux forces. La première, constante, est dirigée dans la direction du bateau. La seconde est un moment, par rapport à l'axe Z du bateau, dont la grandeur équivaut à un angle de roue multiplié par un ratio fixe.

Compte tenu de l'inertie du navire et pour effectuer des changements de direction en douceur, ce ratio a été fixé à $0,2$. La roue est fixée au navire par le biais d'une charnière impliquant deux limites d'angle min/max, un léger effet rebond à ces limites et un effet ressort par rapport à la position par défaut de la roue. Lorsque l'utilisateur tourne la roue virtuelle (cf figure 5.15), le moment fait ainsi modifier la direction du bateau. Pour ce faire, deux collisionneurs, ne servant que de *triggers*, sont attachés à la roue et au noeud de la main. Lorsque celui de la main entre en collision avec celui de la roue, l'angle formé entre le noeud de la main et l'axe de rotation de la roue est stocké et utilisé pour faire tourner la roue à la frame suivante de sorte que la roue suive bien la main. Lorsque la main quitte la roue, le dernier angle reste appliqué, tout en se décrémentant, et ce afin d'appliquer un effet de friction (Barreau et al., 2015a).

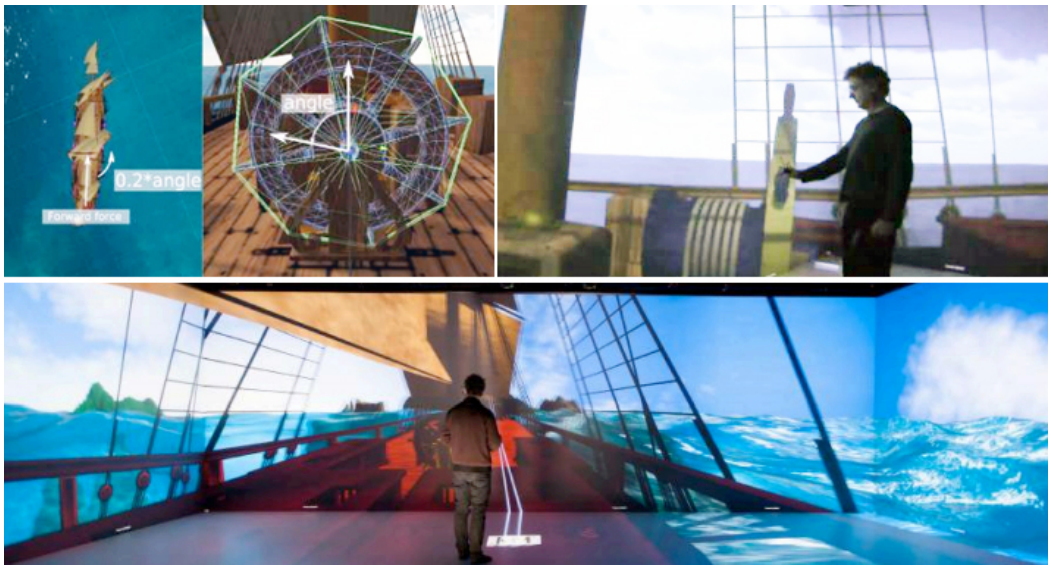


FIGURE 5.15 – Commande de direction avec la roue du Boullongne

Autre élément du Boullongne virtuel intrinsèquement susceptible d'être mis en fonctionnement, le canon est sélectionnable par l'utilisateur grâce à un pointeur. La pression d'un bouton du joystick peut alors entraîner le tir d'un boulet (cf figure 5.16) (Barreau et al., 2015a). L'action va entraîner le déclenchement des éléments suivants :

- Son d'explosion, fumée, feu et particules étincelantes
- Création d'un nouvel objet boulet de canon, à l'intérieur du canon, avec une force initiale aléatoire
- Particules de splash d'eau associées à un son de projections d'eau (au contact de l'eau)

- Destruction du boulet (deux secondes après le contact de l'eau)

FIGURE 5.16 – Tir au canon sur le Boullongne virtuel

Les futures interactions à implémenter pour l'étude du Boullongne seront déterminées par l'historienne afin qu'elles puissent contribuer à ses recherches.

Modification d'un paramètre de simulation À partir de simulations de climat (Boullongne (Barreau et al., 2015a)) et d'éclairage naturel (sucrerie jésuite (Barreau et al., 2015b)) décrites plus loin, nous avons implanté des possibilités d'interaction permettant d'agir sur ces aspects. L'utilisateur peut ainsi agir sur la vitesse de l'alternance du jour et de la nuit dans la sucrerie jésuite (cf figure 5.17) à l'aide d'un joystick. Il peut également modifier la hauteur et la crête des vagues entourant le Boullongne. Le mouvement du navire, la lumière du soleil et le son du vent sont ainsi directement impactés, procurant à l'utilisateur le sentiment d'être pris dans une tempête (cf figure 5.22).

FIGURE 5.17 – Action sur la vitesse de l'alternance jour/nuit au sein de la sucrerie jésuite

5.1.3 Apports pour l'archéologie

5.1.3.1 Apports d'informations archéologiques

Pour ce qui est, du point de vue archéologique, de l'apport de l'échelle 1:1 et de la stéréoscopie, il est apparu qu'elles permettent de supprimer des ambiguïtés concernant les dimensions des restitutions. Même si cette échelle 1:1 peut être perçue sur un seul (simple) écran large (Smith *et al.*, 2001), l'utilisateur voit dans Immersia son corps entier capable de naviguer naturellement au sein de la restitution, notamment grâce à l'absence de surface de projection. Cela implique une absence de doute sur l'appréhension des volumes. Auparavant sur un écran de PC classique, l'archéologue responsable de l'étude du temple du Haut-Bécherel et de la villa de Bourg Saint-Père trouvait les colonnes du temple restituées trop larges, et certaines incohérences architecturales pour la villa. En Immersia, ses doutes sur les proportions du temple, définies à l'époque par Vitruve, se sont ainsi dissipés (cf figure 5.18) (Barreau et al., 2014c). Sur le Boullongne virtuel, l'historienne responsable s'est, quant à elle, rendu compte de l'exiguïté des ponts et ainsi des difficultés potentielles de circulation. À propos de ce type d'aspect fonctionnel, les immersions à l'échelle 1:1 que nous avons proposées ont permis la prise en compte des efforts physiques liés au déplacement et ainsi la détection de potentiels problèmes posés par la restitution. Plus généralement, les apports d'informations archéologiques sont liés aux types de perceptions se dégageant des immersions pouvant être résumés dans la figure 5.19.

FIGURE 5.18 – Vérification à l'échelle 1:1 des proportions de la restitution du temple du Haut-Bécherel

5.1.3.2 Apports pour la pratique archéologique

D'autre part concernant les interactions et au travers de ces différentes implémentations au sein de plusieurs environnements archéologiques virtuels, nous avons aussi pu dégager plusieurs types d'apports scientifiques listés dans la figure 5.20.

Même s'ils ont été développés en aval des projets de production d'environnements archéologiques virtuels, il nous est désormais possible de considérer clairement les deux finalités générales, basées sur ces outils, que sont l'analyse et l'édition à l'échelle 1:1. Grâce à ces développements et dans la suite logique de l'intérêt des productions archéologiques 3d, des perspectives de changements dans les pratiques du métier d'archéologue deviennent ainsi envisageables.

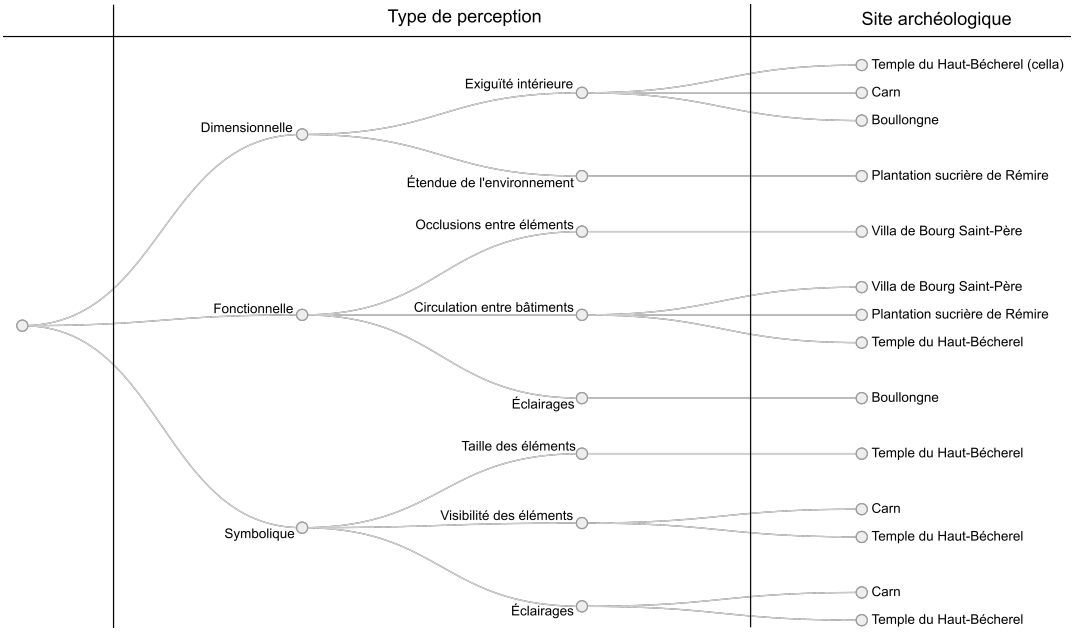
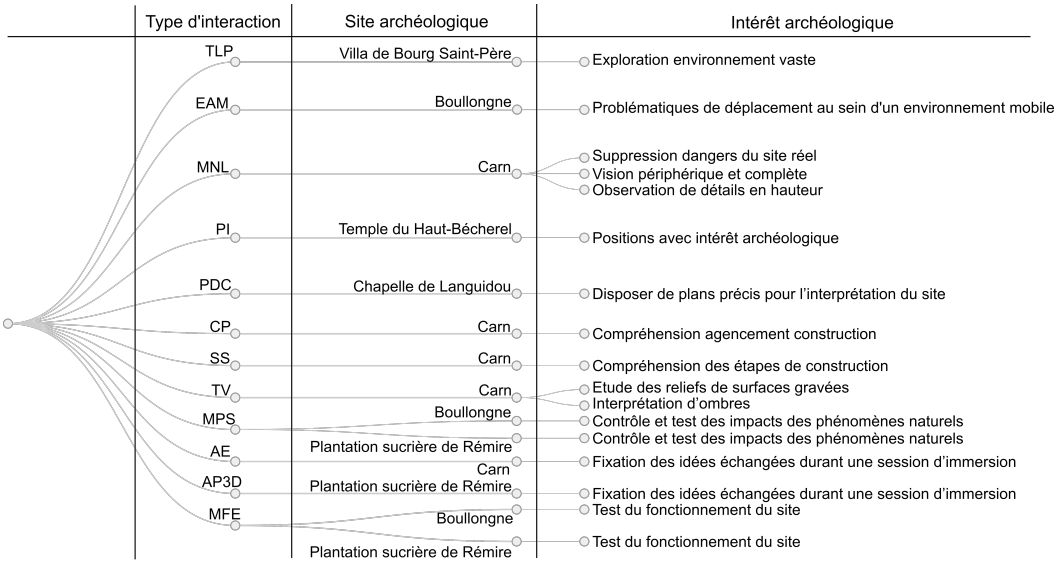


FIGURE 5.19 – Premiers types de perceptions déduits des immersions au sein des environnements virtuels concernés par des interactions à l'échelle 1:1



TLP: Téléportation, EAM: Environnements archéologiques mobiles, MNL: Marche et navigation libre, PI: Points d'intérêt, PDC: Plan de coupe, CP: Clipping plan, SS: Sélection de segmentations, TV: Torche virtuelle, MPS: Modification d'un paramètre de simulation, AE: Annotation épinglée, AP3D: Annotation par primitive 3D, MFE: Mise en fonctionnement d'un élément

FIGURE 5.20 – Interactions proposées pour l'archéologie : sites concernés et apports scientifiques

5.2 Simulation de certains aspects de l'environnement archéologique

Pour donner une suite aux simulations évoquées précédemment (chapitre 2), nous avons supposé qu'elles pouvaient dans un premier temps dynamiser l'environnement archéologique virtuel et en augmenter l'immersion. Nous avons ainsi conjecturé le fait que la simulation visuelle et sonore, de principes physiques (sous-section 5.2.1) ou d'êtres vivants (sous-section 5.2.2), permettrait au scientifique de mieux appréhender et comprendre le fonctionnement et l'évolution du site qu'il étudie.

5.2.1 Milieux et principes physiques

L'influence du milieu naturel sur les sites archéologiques et les hommes qui les ont occupés est une thématique largement étudiée (Goldberg et Macphail, 2008). À présent, nous allons évoquer des simulations de terrain et de mer impactant le Boullongne virtuel, afin de mettre en lumière leur intérêt en temps réel. Puis, nous aborderons d'autres simulations physiques concernant la mécanique propre du Boullongne, en insistant sur l'importance de la physique des bâtiments en archéologie, ainsi que celle de l'éclairage naturel pour l'étude des activités agricoles.

5.2.1.1 Considérations lithosphériques et hydrosphériques

L'environnement virtuel dans lequel se situe le Boullongne consiste en un carré de 1 km^2 de mer parsemé de quelques îles. Le navire est positionné initialement sur le bord d'une des îles. Des murs invisibles, représentés sur la figure 5.21 par des lignes vertes, sont positionnés de façon à empêcher le navire de se rendre jusqu'aux bords de l'environnement. Ils forment une frontière quasi circulaire évitant au bateau de se retrouver bloqué trop brusquement. La zone de navigation dispose ainsi d'un diamètre de 900 mètres. Excepté le Boullongne en tant que tel, l'environnement dans lequel il évolue ne correspond pas à une quelconque réalité archéologique de la route des Indes (que le bateau parcourait). La véracité de cet environnement ne faisait en effet pas partie des objectifs de ces premiers travaux (Barreau et al., 2015a). Des restitutions de portions de côtes et de comptoirs seraient cependant tout à fait pertinentes pour répondre à des problématiques de stratégies et à des techniques de navigation, etc.

Le *Unity Community Ocean project*, qui permet de représenter vagues et environnements sous-marins grâce à des *shaders*, scripts et autres fonctionnalités du moteur de jeu Unity 3D (Yang *et al.*, 2011), effectue la simulation de la mer. Il s'agit d'un algorithme de déformation de plan avec un matériel spécifique correspondant à une mer. Des modifications ont été apportées afin de permettre à l'utilisateur de contrôler la taille et la puissance des vagues. Nous avons également modifié la méthode de détermination de la hauteur de la mer, afin de pouvoir faire varier les vagues de 0 à 13 mètres (Barreau et al., 2015a). Comme évoqué précédemment 5.1.2.2, une situation de tempête peut survenir lorsque l'utilisateur modifie le climat (cf figure 5.22). L'ensemble de ces fonctionnalités permet la simulation d'un environnement qui rend possible le test

FIGURE 5.21 – Environnement virtuel dans lequel évolue le Boullongne

d'exploitation du Boullongne virtuel.

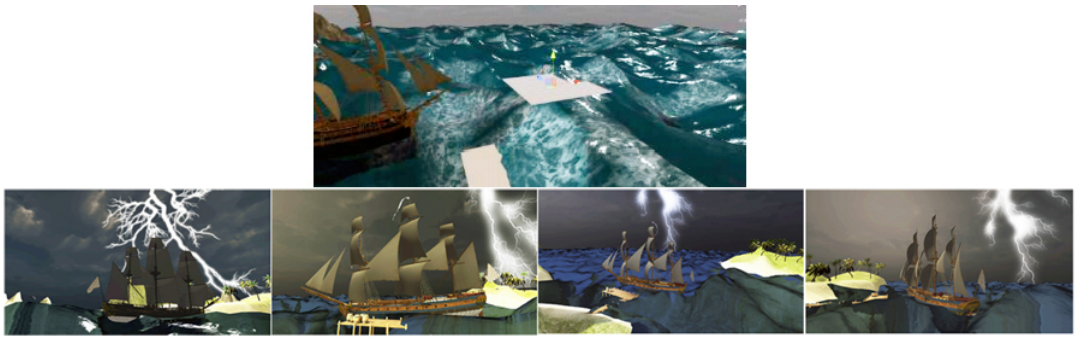


FIGURE 5.22 – Simulation de mer agitée en condition de tempête entourant le Boullongne virtuel

5.2.1.2 Simulations physiques

Physique d'un bâtiment mobile La position du Boullongne est calculée à chaque instant en appliquant différents effets et forces (cf figure 5.23). En plus des forces de navigation décrites en amont, la flottabilité lui permet de flotter et la gravité le pousse vers le bas. Celles-ci sont appliquées au noeud *root* du navire dans un but d'homogénéisation et de respect des formes de ses différentes parties.

Concernant la gravité, le centre de la masse du navire a été défini manuellement à proximité du fond de la coque. Pour simuler la flottabilité la plus réaliste possible, dix points ont été définis sur la coque, tous à la même hauteur et répartis autour du centre de masse (cf cubes roses figure 5.24). Sur chacun de ces points de coordonnées (x, y, z), une force dirigée, vers le haut, est appliquée avec l'intensité suivante :

$$F_{flottabilite} = forceRatio \times max(0, niveau_{eau}(x, y, z) - y)$$

Cette intensité est ainsi proportionnelle à la profondeur d'eau sous laquelle se situe le point et devient nulle lorsqu'il se situe au-dessus. Nous avons fixé, de manière empirique, la valeur $forceRatio$ à 2, ce qui semble donner un effet plus réaliste. Une valeur inférieure

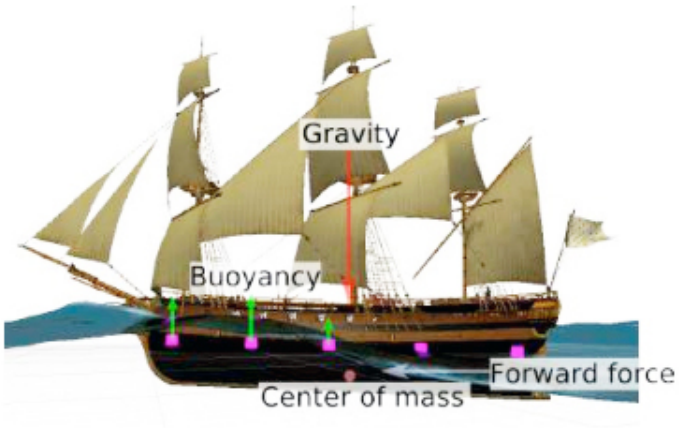


FIGURE 5.23 – Forces physiques appliquées au Boullongne

entraîne le navire trop profondément sous les vagues. Une valeur plus élevée implique un tangage et des embardées trop élevées (Barreau et al., 2015a). Dès lors, les mouvements du Boullongne restent cohérents avec ceux de l'environnement, évoqués précédemment, pour en permettre l'étude.

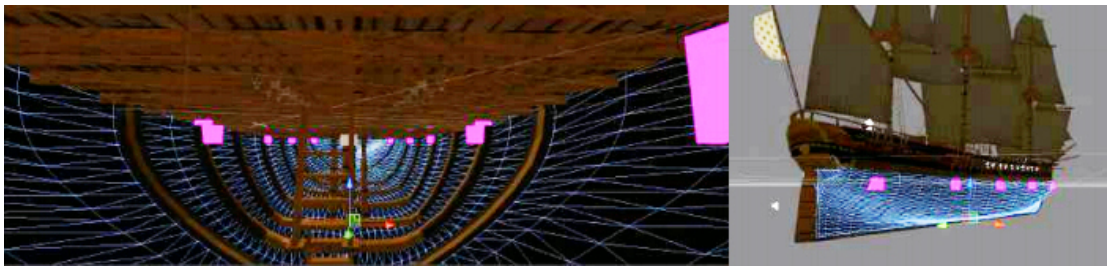


FIGURE 5.24 – Dispositions des points de flottabilité du Boullongne

Éclairage naturel En archéologie, l'étude des activités agricoles représente un volet important, car elles touchent nécessairement l'humanité au moins depuis la révolution néolithique (Summerhayes *et al.*, 2010). Les liens évidents entre agriculture et ensoleillement nous ont ainsi poussés à étudier l'intégration d'une simulation de l'évolution de la lumière du soleil pendant une journée complète sur le site de la plantation sucrière de Rémire. Grâce aux coordonnées du site et au *NREL's Solar and Moon Position Algorithm* (Reda, 2010), nous avons pu calculer les zéniths et azimuts du soleil et de la lune, tels qu'ils devaient apparaître à l'époque, avec des incertitudes de $\pm 0.0003°$ pour le soleil et $\pm 0.003°$ pour la lune. À partir des positions de la lune, il est également possible d'appliquer et positionner des textures de ciel étoilé disponibles dans le Tycho Catalog Skymap (Wright, 2012). De cette façon, nous avons pu simuler une évolution complète de l'éclairage naturel de l'habitation sur 24 heures (cf figure 5.25) (Barreau et al., 2015b).

FIGURE 5.25 – Simulation de l'éclairage naturel du site de la plantation sucrière de Rémire sur une période de 24 heures

Simulation sonore L'environnement virtuel du Boullongne comprend un certain nombre de simulations de sons spatialisés en binaural afin d'améliorer l'immersion de l'utilisateur. Des craquements de bois de la coque sont produits aléatoirement, des détonations de canons sont émises lorsque ceux-ci sont actionnés et l'environnement baigne dans un son d'ambiance de vent et de mer qui changent en fonction des paramètres climatiques.

5.2.2 Êtres vivants

Considérant les liens entre l'homme et son milieu, il semble intéressant à ce stade de réfléchir aux possibilités de simulations d'êtres vivants peuplant les environnements archéologiques. Afin de proposer des possibilités d'étude en temps réel de sujets archéologiques moins liés aux bâtiments, nous allons évoquer quelques exemples de simulations de faune, flore et êtres humains intégrées en environnements archéologiques virtuels.

5.2.2.1 Flore

Comme évoquée précédemment, la flore constitue l'élément majeur du site de la plantation sucrière de Rémire. Nous avons ainsi planté virtuellement de la végétation sur une superficie d'environ $3,8/5,3kms$, dont la topographie résulte d'altitudes issues de sondages, cartes actuelles et du XVIII^{e} siècle. La végétation aux XVII^{e}/XVIII^{e} siècles est cependant différente de celle d'aujourd'hui. Au-delà des plantes utilisées dans l'activité du site d'après les sources directement liées (cacaoyer, caféier, canne à sucre et coton), il semble difficile d'énumérer d'autres plantes. En comparant avec les sources d'un botaniste ayant visité l'endroit à l'époque (Aublet, 1775), nous avons également

relevé les plantes suivantes : Baumier du Pérou, Cannelier de Ceylan, Campêche, Goyavier à grandes fleurs, Hura crepitans, Cacaoyer et Palétuvier blanc (cf figure 5.26). Ainsi en plus de la canne à sucre et du citronnier, nous avons stocké quasiment chacune de ces plantes, à partir d'une bibliothèque de plantes 3D quand elle s'y trouvait (XfrogPlants, 2015), et les avons modélisés dans le cas contraire.

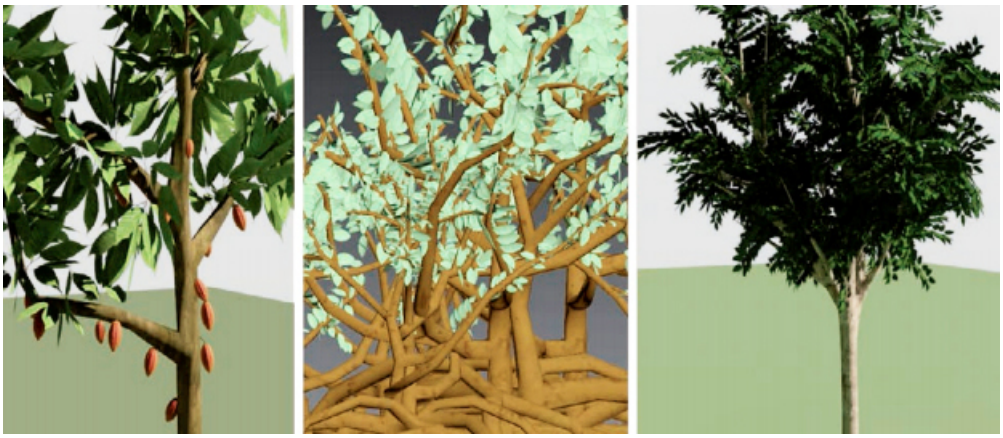


FIGURE 5.26 – Rendus 3D de cacaoyer, palétuvier blanc et cannelier de Ceylan

Le placement des caféiers, des zones forestières et des plants de canne à sucre a été effectué de manière semi-automatique avec l'outil *terrain brush* de Unity dans des zones évoquées par les sources (cf figure 5.27). Notamment pour les plants de canne à sucre, des paramètres de densité et de différences aléatoires de positions/dimensions s'imposaient ont été utilisés pour simuler la non-homogénéité de la réalité. On constate que 787 000 plantes sont ainsi présentes dans l'environnement archéologique virtuel, dont 782 000 plants de canne à sucre. Du point de vue de l'utilisateur à chaque instant et position, seule la végétation la plus proche ($\approx 0,1\%$) s'affiche en tant que mesh avec ombres dynamiques et effets de vent. Les autres plantes sont affichées par le biais d'un *billboard* (ou *quad* texturé) faisant face à l'utilisateur (Barreau et al., 2015b). Compte tenu de l'étendue du site, l'objectif a été de proposer une simulation visuelle de paysage, en plateforme immersive, au sein de laquelle l'utilisateur perçoit sans rupture la végétation proche et le lointaine.

5.2.2.2 Faune

Simulation visuelle Dans un premier temps pour le dynamiser, deux mouettes et une baleine ont été intégrées afin de peupler l'environnement extérieur du Boullongne. Les mouettes volent en cercles de 80 et 90 mètres de diamètre autour du navire. La baleine nage à proximité de la surface de la mer en réalisant également un cercle de 100 mètres de diamètre au sud-ouest de l'île principale. En outre, elle plonge et change sa vitesse de nage de manière aléatoire (Barreau et al., 2015a). Plus tardivement et en suivant les indications de l'ouvrage dédié (Boudriot, 1983), nous avons intégré un bétail virtuel hébergé dans la cale qui servait à nourrir les passagers (cf figure 5.28).

FIGURE 5.27 – Simulation 3D de végétation sur la plantation sucrière de Rémire

Bien qu'ici occasionnelle, cette intégration d'animaux soulève la question de l'impact de ceux-ci sur l'environnement et de leurs potentielles interactions avec les humains virtuels et/ou l'utilisateur immergé.

Simulation sonore Au-delà des sons découlant de l'activité humaine (Safa et al., 2016), la faune d'un environnement archéologique virtuel en produit certains qu'il peut être intéressant de restituer. Ces restitutions s'intègrent dans un champ disciplinaire vaste et complexe appelé l'archéoacoustique (Scarre et Lawson, 2006) (Eneix, 2015). Conscients de la richesse faunistique de la plantation sucrière de Rémire, nous nous sommes rapprochés d'un éthologue spécialiste de la région afin d'établir deux listes cohérentes d'animaux compatibles avec la végétation décrite précédemment. La première regroupe 10 animaux peuplant potentiellement la zone de cultures de canne à sucre; la seconde, 16 animaux probablement présents dans les zones arborées proche des bâtiments. Munis d'échantillons de sons d'animaux disponibles sur un site web spécialisé (canto foundation, 2014), nous avons structuré un fichier en XML regroupant les données permettant l'intégration de ces sons en réalité virtuelle (cf figure 5.29) (Barreau et al., 2015b).

Cette première implémentation de génération d'ambiance sonore issue d'une faune laisse présager deux voies concernant le positionnement des sources. Celles-ci pourraient en effet découler automatiquement de la géométrie des zones de flore ou être placées par un utilisateur expert.

5.2.2.3 Humains

Les êtres humains occupant la plantation sucrière de Rémire étaient nombreux et menaient des activités diverses et complexes. Contrairement aux humains du Boullongne décrits ensuite, nous n'avons pas encore effectué de *motion capture* afin de simuler

FIGURE 5.28 – Faune peuplant l'environnement virtuel du Boullongne

```
<animals>
  <animal name="Columbina passerina*">
  <area name="sugarcane" />
    <repartition number="2" delay="10"
variation="4" spawn="0.25" />
    <sound range="35" volume="0.5" file="..."
/>
  </animal>
```

FIGURE 5.29 – Structure XML des données sonores et sphères représentant les sources intégrées dans l'environnement de la plantation sucrière de Rémire

des activités. Cependant et compte tenu du nombre important d'individus concernés, nous en avons établi un protocole de restitution de ceux-ci (cf figure 5.30), également applicable pour d'autres sites (Barreau et al., 2015b). Des logiciels permettent la création d'humains 3D aux parties du corps personnalisables. Mais la question des vêtements reste souvent ardue. Sans parler de costumes complexes, le logiciel Fuse 1.0 (Maher, 2014) permet la création d'habits du quotidien passé très simplement et rapidement. De plus, ce logiciel propose un outil de *rigging* en ligne permettant d'intégrer un résultat rapide dans Unity. Libérée de cette contrainte technique forte, la *motion capture* sur base archéologique autorise ainsi la restitution d'humains dans diverses activités.

FIGURE 5.30 – Personnage d'esclave 3D éditable, corps *riggé* et squelette et dessin de pressage de manioc sur la plantation sucrière de Rémire

D'abord dans une dynamique de simulation d'activités humaines, trois personnages ont été animés sur le Boullongne :

- le capitaine du navire : à proximité de la barre
- 1er matelot : au milieu du pont supérieur
- 2nd matelot : au niveau des canons à tribord

Ces personnages, issus du jeu vidéo *Age of Pirates*, ont été équipés de costumes typiques de la Compagnie des Indes orientales puis, la simulation du mouvement de multiples instances a été implémentée, notamment pour observer l'espace occupé par les passagers du navire (cf figure 5.31) (Barreau et al., 2015a).

FIGURE 5.31 – Trois personnages à bord du Boullongne et simulation du mouvement de multiples instances

En amont du protocole de restitution d'humains établis pour la plantation sucrière de Rémire, nous avons entamé des sessions de *motion capture* avec des historiens spécialisés, et ce sur la base de gravures illustrant des scènes de vie à bord (cf figure 5.32). Quelques

marins virtuels ont donc été créés, mais le fastidieux travail de skinning est à l'heure actuelle encore en cours.

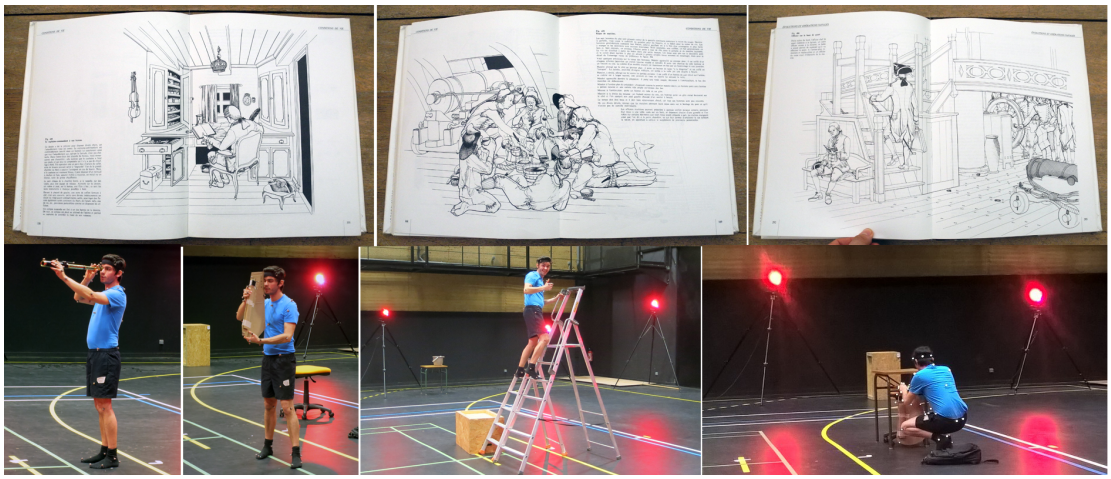


FIGURE 5.32 – Gravures illustrant des scènes de vie à bord et session de *motion capture* réalisée avec des historiens

L'intégration (pour l'instant) "simpliste" de ces humains virtuels a donc ouvertement comme objectif le fait de susciter, auprès de la communauté archéologique, l'envie d'explorer des hypothèses de restitution de scènes de vie quotidienne.

5.2.3 Outil pluridisciplinaire

L'objectif général de ces implémentations de simulations est de montrer leur intérêt, en temps réel, au sein d'un environnement archéologique virtuel. Dépasser le précalculé et tenter d'associer au mieux ces simulations à des techniques d'interaction permet de faire prendre conscience, à la communauté des archéologues, des possibilités de nouvelles formes de tests d'hypothèses. Même s'il est nécessaire d'acquérir un plus grand nombre de retours d'utilisateurs, nous postulons à ce stade l'intérêt du contrôle des paramètres liés aux différents facteurs naturels et anthropiques pouvant impacter le site archéologique.

5.3 Valorisation du savoir scientifique

De la production d'environnements archéologiques 3D découle fréquemment des volontés de valorisation. Même si ce domaine présente des liens directs avec l'archéologie, certains de ses enjeux ont été abordés dans cette thèse plutôt en second plan. Parmi les pratiques de valorisation effectuées, nous évoquerons la conférence grand public (sous-section 5.3.1), les expériences immersives (sous-section 5.3.2), l'exposition (sous-section 5.3.3), et la médiation audiovisuelle (sous-section 5.3.4).

5.3.1 Conférence grand public

Afin d'éviter que l'expérience des Journées Nationales de l'Archéologie 2013, décrite ensuite, soit simplement perçue comme un divertissement, nous l'avons introduite par une conférence à trois voix. Celle-ci concernait d'abord l'archéologie, puis la production 3D appliquée à l'archéologie, et enfin la réalité virtuelle. Elle a été reconduite sur plusieurs jours, et ce devant des groupes scolaires et un public de tous âges. Malgré la nécessité de moyens techniques et humains importants (cf figure 5.33), l'intérêt du public pour ces thématiques était flagrant : nombreux, attentif, et questions pertinentes (Gaugne et al., 2013).

FIGURE 5.33 – Conférence introduisant une expérience immersive auprès d'un groupe scolaire dans le cadre des Journées Nationales de l'Archéologie 2013

5.3.2 Expériences immersives

Les propositions d'immersion au sein d'environnements archéologiques virtuels se sont d'abord effectuées auprès des archéologues spécialistes des sites concernés (cf figure 5.34), mais aussi plus généralement de communautés d'archéologues (Barreau et al., 2015a) et d'informaticiens. Les retours critiques quant aux degrés de pertinences des environnements archéologiques et outils d'interaction favorisent ainsi la progression de ces travaux.

Une expérience immersive dans la plateforme Immersia a ensuite été offerte au grand public lors de ces Journées Nationales de l'Archéologie. Une seule personne pouvant passer à la fois impliquait un unique environnement : celui de la villa de Bais (Gaugne et al., 2013). La navigation et la marche naturelle ont été limitées à et autour de cinq points d'intérêt. Chaque utilisateur, tous âges confondus, a pu se confronter aux différentes impressions liées à l'expérience (cf figure 5.35). Il a été intéressant d'observer combien son aspect ludique permet de véhiculer aisément des savoirs scientifiques.

Ce dispositif peut impliquer des frustrations en raison de la rapidité des sessions due au grand nombre de personnes à faire passer. D'autres expériences ont été réalisées notamment avec un mini-cave ou des casques de réalité virtuelle dans le cadre des

FIGURE 5.34 – Équipe d'historiens expérimentant le Boullongne virtuel

FIGURE 5.35 – Expérience immersive grand public au sein de la villa de Bais ayant eu lieu dans le cadre des Journées Nationales de l'Archéologie 2013

Journées Nationales de l'Archéologie 2014 (cf figure 30). Même si leur démocratisation récente peut atténuer l'impact en terme d'attrait et de valorisation, les possibilités plus confortables d'accompagnement et d'explications scientifiques en augmentent la qualité (Barreau et al., 2015a).

FIGURE 5.36 – Expériences immersives grand public avec casques et mini-cave, Journées Nationales de l'Archéologie 2014

5.3.3 Exposition

Considérant la reconstitution du contenu de céramique à partir de tessons, nous avons eu l'idée de l'imprimer en 3D, surmontées de quelques métadonnées, afin d'observer si l'impression pouvait servir de support des tessons dans un cadre de muséale et patrimoniale. L'imprimante utilisée est un *MakerBot Replicator 2X*. Le volume 3D s'avérant trop imposant pour l'imprimante, l'impression a dû être effectuée en deux fois (cf figure 5.37). Cependant, vu le faible coût de production et les possibilités de recoller les parties, nous pensons que la réalisation de ce type de support pourrait se généraliser dans le domaine de la médiation (Barreau et al., 2014d).

Un assortiment de posters, d'images de reconstitutions, et de dispositifs interactifs classiques a été également plusieurs fois soumis au grand public, notamment dans le cadre des Journées Nationales de l'Archéologie 2013 (Gaugne et al., 2013) (cf figure 5.38) et de la Journée Science et Musique 2016, afin de valoriser les productions 3D et les problématiques scientifiques en archéologie.

5.3.4 Médiation audiovisuelle

La valorisation des travaux effectués par un audiovisuel traditionnel s'est révélée un exercice assez complexe (cf figure 5.39). D'une part, le rendu d'une session de réalité filmée, diffusé sur un écran classique, a laissé intrinsèquement un goût amer, notamment en raison de la stéréoscopie. Une solution a consisté à diffuser parallèlement le rendu directement issu du moteur de jeu, mais celle-ci peut perdre le téléspectateur habitué aux diffusions vidéoludiques. D'autre part, certains impératifs en matière de sensationnalisme de journalistes et réalisateurs ont tendance à diluer les propos scientifiques.

FIGURE 5.37 – Modèle 3D et impression d'un support de tessons de céramique

FIGURE 5.38 – Exposition de productions 3D auprès durant les Journées Nationales de l'Archéologie 2013 et exposition/présentation des impressions 3D de la flûte en os aux Journée Science et Musique 2016

Cependant, les impacts sur le plan de la diffusion semblent suffisamment conséquents pour que cette pratique en vaille la peine. Il s'agit alors d'accompagner autant que faire se peut les journalistes afin de minimiser le risque de messages caricaturaux (Barreau et al., 2015a).

FIGURE 5.39 – Tournage d'un documentaire sur le Boullongne virtuel pour l'émission Thalassa "Les perles du Morbihan" diffusée le 15/05/2015

Conclusion

Nous avons présenté, à travers ce manuscrit, nos travaux sur la production, l'exploration et l'analyse d'environnements archéologiques virtuels. L'objectif a été de développer la production adaptative et itérative d'environnements archéologiques 3D guidée par l'archéologue et l'utilisation d'environnements archéologiques virtuels. Nous présentons, dans la suite de cette conclusion, le bilan de nos travaux quant aux contributions réalisées ainsi que différentes perspectives.

Bilan des contributions

Après avoir défini, contextualisé et pris en compte dans le chapitre 3 certaines limitations inhérentes à la production de données archéologiques 3D, nous avons d'abord proposé l'étude d'une structure dédiée au travers d'une analyse de 62 de ses projets (Barreau et al., 2016). À partir de cela, nous avons pu constituer une base de réflexion permettant une plus grande intégration de l'archéologue dans les processus de production.

Concernant cette production d'environnements archéologiques 3D détaillée dans le chapitre 4, nous avons d'abord exposé plusieurs numérisations de l'existant d'éléments de différentes tailles, allant de l'objet (Barreau et al., 2014d) (Safa et al., 2016) au site complet (Barreau et al., 2013) (Gaugne et al., 2013), par photogrammétrie (Gaugne et al., 2012), lasergrammétrie (Hulot et al., 2015) et µ-tomodensitométrie (Safa et al., 2016). Nous avons ensuite abordé la modélisation de l'hypothétique à partir de vestiges existants (Barreau et al., 2013) et du traitement de la documentation archéologique (Barreau et al., 2014b) (Barreau et al., 2015a). Pour lier l'existant et l'hypothétique, nous avons tenté de les comparer (Barreau et al., 2014a) puis considéré l'étape de construction du site (Gaugne et al., 2012) et ses changements d'états successifs. Plusieurs déductions scientifiques ont découlé de ces travaux. Elles ont notamment concerné la preuve de technique de construction (Gaugne et al., 2012) et se sont basées sur des études quantitatives (Barreau et al., 2014d) (Hulot et al., 2015). Au-delà des intérêts techniques et théoriques suscités de part et d'autre des disciplines, l'objectif a été à ce stade de relever les différentes problématiques liées aux contraintes de production, à leur exploitation par la communauté scientifique et aux blocages subsistants.

À partir de ces questions est ainsi née la volonté d'améliorer l'implication et l'autonomie des archéologues autour désormais de l'exploration, l'édition et l'analyse des productions d'environnements archéologiques 3D. Décrits dans le chapitre 5, plusieurs

types de navigations à l'échelle 1:1 et interactions avec objets, pouvant avoir des impacts sur les environnements virtuels, ont été implémentés. Pour parcourir ces environnements de différentes dimensions et parfois mêmes mobiles (Barreau et al., 2015a), nous avons proposé des modes de marche, navigation libre, téléportation et par points d'intérêts (Barreau et al., 2014c) (Barreau et al., 2014b). Parmi les outils développés pour leur édition et analyse, nous pouvons évoquer le *clipping plan* (Gaugne et al., 2012), le plan de coupe, la torche virtuelle (Gaugne et al., 2012), la sélection de segmentations (Barreau et al., 2014b), l'annotation épinglée (Gaugne et al., 2012) et par primitive 3D. Nous avons aussi pu travailler sur la mise en fonctionnement d'un élément et la modification de paramètres de simulation (Barreau et al., 2015a).

Afin de dynamiser ces environnements et d'élargir l'intérêt qu'ils suscitent, notamment auprès d'une communauté plus large que celle réduite aux seuls spécialistes du bâti, nous avons justement opéré l'intégration de simulations visuelles et sonores (Barreau et al., 2015b) (Barreau et al., 2015a) en leur sein, afin de proposer une nouvelle approche pour l'étude du fonctionnement et de l'évolution des sites. Ces simulations ont d'abord concerné les milieux et principes physiques (Barreau et al., 2015a) pour ensuite s'orienter vers le vivant sur des exemples de flore (Barreau et al., 2015b), faune et êtres humains (Barreau et al., 2015a).

Si la valorisation des environnements archéologiques 3D semble aujourd'hui largement répandue, nous avons enfin tenté plusieurs démarches de valorisation des environnements virtuels associés avec des conférences grand public, des expériences immersives, exposition (Gaugne et al., 2013) et médiatisations audiovisuelles.

Avant d'aborder les perspectives envisagées, nous proposons le tableau récapitulatif 5.1 des différents apports et limites liés aux principales contributions de cette thèse.

Table 5.1 – Apports et limites concernant les principales contributions de cette thèse

	Apports	**Limites**
3. Étude d'une structure de production de données archéologiques 3D	Détecter et quantifier les paramètres de production	Nécessité de moyens économiques importants
4.1. Numérisation de l'existant		
4.1.1. Photogrammétrie	• Cf Table 1.2 • Archéo: Créer une base de discussion avec l'archéologue pour l'analyse (et non une fin en soi) • Info: Prendre en compte des nuages de points ou maillages denses, notamment en contextes temps réel	Cf Table 1.2

4.1.2. Lasergrammétrie	• Cf Table 1.2 • Archéo: Créer une base de discussion avec l'archéologue pour l'analyse (et non une fin en soi) • Info: Prendre en compte des nuages de points ou maillages très denses, notamment en contextes temps réel	• Cf Table 1.2 • Info: Sous-échantillonner les nuages/maillages trop denses pour de l'affichage/interaction en temps réel
4.1.3. µ-tomodensitométrie	Meilleure précision du maillage permettant des analyses poussées	Absence de texture
4.2. Modélisation de l'hypothétique		
4.2.1. Apports de l'existant	• Archéo: Mettre en lumière une restitution tuteurée par l'existant • Info: Prendre en compte plusieurs niveaux de complexité de maillages (hypothétique vs existant)	Non prise en compte générale de problématiques liées à la physique des matériaux
4.2.2. Traitement de la documentation archéologique	Mettre en lumière les volumes de documentations archéologiques à intégrer pour une restitution pertinemment détaillée	Absence de centralisation d'un corpus international de modèles 3D/textures de référence
4.3. Évolution temporelle		
4.3.1. Comparaison entre l'hypothétique et l'existant	• Archéo: Quantification de cette comparaison • Info: Algorithme de soustraction d'un nuage de points à un maillage	Nécessité d'une grande qualité et certitude scientifique concernant le modèle 3D de l'hypothétique
4.3.2. Construction d'un environnement archéologique	Test d'hypothèse de construction par animation 3D	Absence de prise en compte d'aspects physiques tels que le poids ou les frottements
4.3.3. Changements d'état	• Archéo: Appuyer sur l'intérêt de l'évolution dans le temps d'un site archéologique • Info: Prendre en compte de la dimension temporelle	Absence de prise en compte de l'érosion des matériaux
4.4. Déductions scientifiques		

4.4.1. Preuve de technique de construction	• Archéo: Segmenter l'existant pour en déduire des hypothèses sur sa construction • Info: Prendre en compte la nécessité d'outils de segmentation	Absence de prise en compte de l'érosion des matériaux
4.4.2. Études quantitatives	Créer de la donnée scientifique à partir de modèles 3D	Nécessité de disposer d'une numérisation de bonne qualité
5.1. Interactions à l'échelle 1:1		
5.1.1.1. Marche et navigation libre	Se déplacer à vitesse d'homme sur n'importe quelle zone de l'environnement	Aire de déplacement limitée par le dispositif de réalité virtuelle
5.1.1.2. Téléportation	Explorer des environnements archéologiques étendus	Points d'intérêt à définir à l'avance
5.1.1.3. Points d'intérêt	Amener l'utilisateur à observer des zones d'intérêts	Points d'intérêt à définir à l'avance
5.1.1.4. Environnements archéologiques mobiles	Considérer l'exploration de moyens de transport en mouvement	Relations encore "simplistes" entre le moyen de transport et son milieu
5.1.2.1. Clipping plan	Isoler une zone de l'environnement	
5.1.2.1. Plan de coupe	Extraire un document de travail	Nécessité de trouver un moyen plus précis pour le positionnement du plan
5.1.2.1. Torche virtuelle	Se focaliser sur une zone de l'environnement	
5.1.2.1. Sélection de segmentations	Afficher / mettre en lumière des unités de construction	Sélections créées en amont par un infographiste
5.1.2.2. Annotation épinglée	Fixer des idées spatialisées en un point	Nécessité d'un dispositif de saisie de texte
5.1.2.2. Annotation par primitive 3D	Fixer des idées spatialisées en volumes primitifs	Nécessité de poursuivre le développement de l'association de ces primitives à des métadonnées
5.1.2.2. Mise en fonctionnement d'un élément	Tester le fonctionnement d'un site à la première personne	Chaque élément restitué implique un développement plus ou moins long pour permettre son fonctionnement
5.1.2.2. Modification d'un paramètre de simulation	Tester l'impact de phénomènes naturels et physiques sur un environnement	Chaque simulation implémentée implique un développement pour la lier avec une interaction

5.2. Simulation de certains aspects de l'environnement archéologique		
5.2.1.1. Géologiques et hydrologiques	Prendre en compte du paysage et de ses dynamiques	La génération procédurale ne produit pas de restitution pertinente du point de vue archéologique
5.2.1.2. Physique d'un bâtiment mobile	Prendre en compte l'impact des mouvement	Absence de réalisme concernant le comportement des matériaux
5.2.1.2. Éclairage naturel	Prendre en compte dynamiquement l'éclairage du passé, moins artificiel que celui du présent	Complexité de configuration et notions d'astronomie requises
5.2.2.1. Flore	Considération de l'intérêt de la restitution paysagère et des aspects agricoles	Complexité des maillages
5.2.2.2. Faune	Restituer l'ambiance sonore du milieu naturel	Absence d'interaction
5.2.2.3. Humains	Considération de la matière première des sciences humaines	Absence d'interaction

Perspectives

En se focalisant sur une archéologie avec une approche purement scientifique, c'est à dire s'affranchissant d'impératif de valorisation, il est possible d'imaginer comment la réalité virtuelle peut accompagner l'évolution du métier d'archéologue vers un idéal que nous allons tenter de décrire.

Perspectives théoriques

Avant cela, il est nécessaire de lever une ambiguïté. « Nouvelles technologies » étant communément synonyme de « remplacement » ou même d'« uberisation » du métier, nous ne parlerons pas d'un travail en réalité virtuelle pouvant substituer un travail de terrain. La détection, l'observation et l'enregistrement sont révolutionnés aujourd'hui par nombre d'outils numériques et notre réflexion vise, en aval, une transformation de ces savoir-faire. L'archéologue doit désormais pouvoir comprendre les systèmes de production et les modes d'exploitation auxquels appartenaient tous les ensembles complexes et objets archéologiques qu'il étudie, de l'éclat de silex au paysage anthropisé. C'est sur cet axe que nous placerons notre réflexion en premier lieu théorique.

Service (public) de production

Pour ce faire, il convient tout d'abord de supposer que pour chaque fouille, terrestre, subaquatique ou sous-marine, un service prenne en charge la totalité des numérisations associées. Concrètement, ce service fournirait à l'archéologue la totalité des fichiers

3D correspondants aux numérisations, géoréférencées et aussi précises que possible, du maximum de vestiges mobiliers, immobiliers, humains et unités stratigraphiques découverts. Ce maximum est évidemment lié à des contraintes scientifiques, logistiques et économiques, mais sa définition et son étude devraient sûrement faire l'objet d'un autre doctorat... Ensuite, nous partons du principe, toujours idéaliste, que tout chercheur, archéologue ou non, pourra dans le futur avoir accès à un système de réalité virtuelle permettant des sessions collaboratives de travaux de recherche, aussi poussés que possible.

Session travail en réalité virtuelle

L'objectif théorique d'une session de travail en archéologie doit permettre aux archéologues de mettre en relation les étapes de fabrication, d'utilisation, d'abandon et de réutilisation des ensembles complexes et objets étudiés dans le cadre de processus sociaux économiques. Plus concrètement, les archéologues devraient pouvoir mesurer, analyser, consulter des sources, interpréter, expérimenter et modéliser par le biais d'un système de réalité virtuelle.

Pour faire suite aux logiques multiéchelles évoquées précédemment et couplées à des possibilités de travail collaboratif, les actuelles percées dans le domaine (Le Chénéchal *et al.*, 2016) semblent tout à fait applicables aux environnements archéologiques. Les récentes offres de numérisations 3D du microscopique (Cortese *et al.*, 2017) laissent présager des besoins d'archéologues de circulation entre différentes échelles permettant de nouveaux types d'interprétation.

Enfin à l'issue d'une session et pour poursuivre leur travail, les archéologues devraient pouvoir récupérer des impressions 3D d'assemblages d'éléments archéologiques, là aussi à différentes échelles, ainsi qu'un rapport complet de leurs activités.

Plus concrètement, nous proposons pour terminer ce chapitre et manuscrit quelques propositions de développement d'outils concernant ces sessions de travail, et ce à court, moyen et long terme.

Perspectives informatiques

À court terme, les différentes implémentations de navigation, annotation et simulations évoquées dans le chapitre 5 mériteraient tout d'abord des études statistiques et ergonomiques menées au sein d'une population d'archéologues plus large. La génération de plans de coupe et orthophotographies constitue un besoin réellement important pour les études archéologiques. La manipulation du plan virtuel permettant de les générer doit être ainsi optimisée pour qu'elle devienne complètement intuitive, et ce quelle que soit la dimension de l'élément archéologique étudié, pouvant aller de l'objet à l'ensemble de bâtiments. Le positionnement par l'archéologue de primitives 3D dans l'environnement archéologique virtuel constitue un réel intérêt pour supprimer les incertitudes et erreurs d'emplacement d'éléments archéologiques. Ce travail étant bien entamé, il s'agit désormais de le faire aboutir et, comme précédemment, procéder à des études statistiques et

ergonomiques.

Les tâches à réaliser à moyen terme devraient, d'après nous, d'abord concerner de l'édition d'aspects non anthropiques ayant des impacts sur la perception générale des environnements. Ainsi faire en sorte que l'archéologue, effectuant une session travail en réalité virtuelle, puisse lui-même pour n'importe quel site modifier des élévations de terrain ou faire défiler le temps en lien avec la position exacte des astres (implémentation amorcée à affiner), nous paraît réellement pertinent.

Pour ce qui est de l'analyse et l'édition d'un point de vue général, il nous semble important que l'utilisateur puisse dans un futur plus moins proche :

- Mesurer n'importe quels distance, surface ou volume
- Examiner en zoomant/dézoomant sur n'importe quel élément
- Assigner un niveau de certitude à un élément
- Déplacer, découper et assembler des éléments
- Imprimer en 3d une sélection d'éléments

Enfin, faire fonctionner un élément par le biais d'une interface tangible est désormais possible (Nicolas *et al.*, 2015). Il nous semble ainsi pertinent de multiplier les expériences d'utilisation de ces interfaces tangibles, impactant sur différents types simulations comme ceux décrits précédemment (mécanique, éclairages, etc...), afin de produire de l'information sur l'utilisation d'éléments archéologiques.

Nous estimons que, dans un futur plus lointain, les enjeux se situeront au niveau de la simulation et de l'interaction avec des humains virtuels du passé. Pour restituer leurs gestes dédiés à des tâches disparues, nous partons là encore sur l'hypothèse d'une démocratisation des systèmes de motion capture permettant de simuler des humains en activités du passé. Pour l'archéologue immergé pouvant vérifier la cohérence de l'environnement, il serait ainsi envisageable de :

- Quantifier les rendements des humains virtuels en activité
- Faire interagir cette activité avec l'environnement archéologique virtuel
- Déduire de ces activités une narration du quotidien d'un site archéologique

Références de l'auteur en informatique

Barreau, J.-B., Bernard, Y., Petit, Q., Beuchet, L., Petit, E., Platen, V., Gaugne, R., Le Rumeur, J., and Gouranton, V. (2014a). Combination of 3D Scanning, Modeling and Analyzing Methods around the Castle of Coatfrec Reconstitution. In *International Conference on Culturage Heritage, EuroMed, 2014*, pages 418–426, Lemessos, Cyprus.

Barreau, J.-B., Gaugne, R., Bernard, Y., Le Cloirec, G., and Gouranton, V. (2013). The West Digital Conservatory of Archaelogical Heritage Project. In *DH*, pages 1–8, France.

Barreau, J.-B., Gaugne, R., Bernard, Y., Le Cloirec, G., and Gouranton, V. (2014b). Virtual reality tools for the West Digital Conservatory of Archaeological Heritage. In *VRIC 2014, ACM*, pages 1–4, Laval, France.

Barreau, J.-B., Gaugne, R., and Gouranton, V. (2014c). La réalité virtuelle au conservatoire numérique du patrimoine archéologique de l'ouest. *9ème édition des journées de l'Association Française de Réalité Virtuelle, Augmentée, Mixte et d'Interaction 3D (AFRV)*.

Barreau, J.-B., Gaugne, R., Le Cloirec, G., Bernard, Y., Gouranton, V., and Arnaldi, B. (2016). Study of a structure dedicated to 3d data production and exploration applied to research in archeology. Manuscrit soumis pour publication.

Barreau, J.-B., Nicolas, T., Bruniaux, G., Petit, É., Petit, Q., Bernard, Y., Gaugne, R., and Gouranton, V. (2014d). Photogrammetry based study of ceramics fragments. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 3(4):643–656.

Barreau, J.-B., Nouviale, F., Gaugne, R., Bernard, Y., Llinares, S., and Gouranton, V. (2015a). An Immersive Virtual Sailing on the 18 th -Century Ship Le Boullongne. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 24(3).

Barreau, J.-B., Petit, Q., Bernard, Y., Auger, R., Le Roux, Y., Gaugne, R., and Gouranton, V. (2015b). 3D reconstitution of the loyola sugar plantation and virtual reality applications. In *Computer Applications & Quantitative Methods in Archaeology, CAA* , Sienna, Italy.

Bernard, Y., Barreau, J.-B., Bizien-Jaglin, C., Quesnel, L., Langouët, L., and Daire, M.-Y. (2017). 3d model as a dynamic compilation of knowledge: interim results on the city of alet. *Virtual Archaeology Review*, 8(16):51–60.

Gaugne, R., Barreau, J.-B., Cousseau, F., and Gouranton, V. (2012). Large-scale immersive reconstitution of a Neolithic corbel dome. In *International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, pages 1–8, Brighton, United Kingdom.

Gaugne, R., Le Cloirec, G., Barreau, J.-B., and Gouranton, V. (2013). Experiencing the past in virtual reality A virtual reality event for the French National Days of Archaeology. In *4th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications*, pages 1–6, Budapest, Hungary.

Hulot, O., Jaouen, M., Barreau, J.-B., Bernard, Y., Petit, Q., Gaugne, R., and Gouranton, V. (2015). Study of a wreck in Foreshore Context. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pages 131–138.

Safa, E., Barreau, J.-B., Gaugne, R., Duchemin, W., Talma, J.-D., Arnaldi, B., Dumont, G., and Gouranton, V. (2016). Digital and handcrafting processes applied to sound-studies of archaeological bone flutes. In *Euro-Mediterranean Conference*, pages 184–195. Springer.

Références de l'auteur en archéologie

Laporte, L., Bizien-Jaglin, C., Wattez, J., Guyodo, J.-N., Barreau, J.-B., Bernard, Y., Aoustin, D., Guitton, V., Hamon, G., Jallot, L., et al. (2015). Another brick in the wall: fifth millennium bc earthen-walled architecture on the channel shores. *Antiquity*, 89(346):800–817.

Mens, E., Berthaud, G., Raux, P., Berson, B., Joussaume, R., Le Jeune, Y., Barreau, J.-B., Jupin, S., Bernard, Y., Cousseau, S., et al. (2016). Les stèles gravées du plateau de la bretellière à saint-macaire-en-mauges. *Arqueología y Prehistoria del Interior Peninsular*, 4:165–181.

Références

Abate, D., Hermon, S. et Eliades, I. (2016). Virtual and physical recomposition of fragmented ecclesiastical frescoes using a photogrammetric approach. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pages 153–160.

Acevedo, D., Vote, E., Laidlaw, D. H. et Joukowsky, M. S. (2001). Archaeological data visualization in vr: Analysis of lamp finds at the great temple of petra, a case study. *In Proceedings of the Conference on Visualization '01*, VIS '01, pages 493–496, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.

Agisoft, L. (2011). Agisoft photoscan user manual. *Professional Edition, Version 0.8. 0 (accessed 03.05. 2011.). http://www. agisoft. ru/pscan/help/en/pscan_pro. pdf.*

Al-Adamat, R., Al-Shawabkeh, Y., Al-Kour, O., Al-Shabeeb, A. R. *et al.* (2016). A multi-resolution photogrammetric framework for digital geometric recording of large archeological sites: Ajloun castle-jordan. *International Journal of Geosciences*, 7(03):425.

Alberti, L. (1553). *L'architecture et art de bien bastir, diuisee en dix liures, traduictu de latin en francois par Jan Martin.* Jaques Keruer.

Alberti, L. et Queysanne, B. (2002). *Descriptio Urbis Romae ou comment faire le portrait de Rome.* Collection. Editions de la Villette.

Alberti, L. B. (2013). *La statue: suivi de La vie de LB Alberti par lui-même.* Éditions Rue d'ULM via OpenEdition.

Albertz, J. (2002). Albrecht meydenbauer-pioneer of photogrammetric documentation of the cultural heritage. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(5/C7):19–25.

Andreadis, A., Hemery, A., Antonakakis, A., Gourdoglou, G., Mauridis, P., Christopoulos, D. et Karigiannis, J. N. (2010). Real-time motion capture technology on a live theatrical performance with computer generated scenery. *In Informatics (pci), 2010 14th panhellenic conference on*, pages 148–152. IEEE.

Aniyath, P. K., Gopalan, S. K., Kumari, P. et Chaudhuri, S. (2014). Combined hapto-visual and auditory rendering of cultural heritage objects. *In Asian Conference on Computer Vision*, pages 491–506. Springer.

Applbaum, N. et Applbaum, Y. (2005). The use of medical computed tomography (CT) imaging in the study of ceramic and clay archaeological artifacts from the ancient near east. *In X-rays for Archaeology*, pages 231–245. Springer.

Arbace, L., Sonnino, E., Callieri, M., Dellepiane, M., Fabbri, M., Idelson, A. I. et Scopigno, R. (2013). Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue. *Journal of Cultural Heritage*, 14(4):332–345.

Arles, A., Busdraghi, F., Guyot, J. et Heckes, J. (2011). La photogrammétrie appliquée à l'archéologie minière: premiers essais.

Arnold, D. (2009). 3D-coform: Tools and expertise for 3D collection formation. *In Proceedings of EVA*, pages 94–99.

Aubert, J. (1982). Dessin d'architecture a partir de la geometrie descriptive.

Aublet, F. (1775). *Histoire des plantes de la Guiane Françoise: rangées suivant la méthode sexuelle, avec plusieurs mémoires sur différens objects intéressans, relatifs à la culture & au commerce de la Guiane Françoise, & une notice des plantes de l'Isle-de-France...*, volume 1. PF Didot jeune.

Bale, K., Abbott, D., Gowigati, R., Pritchard, D. et Chapman, P. (2011). Linking Evidence with Heritage Visualization using a large Scale Collaborative Interface. *In* Niccolucci, F., Dellepiane, M., Serna, S. P., Rushmeier, H. et Gool, L. V., éditeurs : *VAST: International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage*. The Eurographics Association.

Balletti, C., Berto, M., Gottardi, C. et Guerra, F. (2013). Ancient structures and new technologies: survey and digital representation of the wooden dome of ss. giovanni e paolo in venice. *ISPRS Ann Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci*, 1(1):25–30.

Baños, F. G., Rodríguez, F. M. M., Alonso, J. I. S. J. et Martín, J. J. F. (2016). Reconstrucción virtual 3d del coro del convento de santa clara de toro (zamora): la recuperación de un ámbito medieval de devoción femenina mediante el registro fotogramétrico y técnicas de renderización. *Virtual Archaeology Review*, 7(15):123–134.

Barazzetti, L., Binda, L., Scaioni, M. et Taranto, P. (2011). Photogrammetric survey of complex geometries with low-cost software: Application to the 'g1' temple in myson, Vietnam. *Journal of Cultural Heritage*, 12(3):253–262.

Barber, C. B., Dobkin, D. P. et Huhdanpaa, H. (1996). The quickhull algorithm for convex hulls. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 22(4):469–483.

Barrile, V., Nunnari, A. et Ponterio, R. C. (2016). Laser scanner for the architectural and cultural heritage and applications for the dissemination of the 3d model. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 223:555–560.

Barsanti, S. G., Remondino, F. et Visintini, D. (2012). Photogrammetry and laser scanning for archaeological site 3D modeling–some critical issues. *In Proc. of the 2nd Workshop on 'The New Technologies for Aquileia', V. Roberto, L. Fozzati.*

Barthes, R. (1964). Rhétorique de l'image. *Communications*, 4(1):40–51.

Bartoš, K., Pukanská, K., Gajdošík, J. et Krajňák, M. (2011). The issue of documentation of hardly accessible historical monuments by using of photogrammetry and laser scanner techniques. *Geoinformatics FCE CTU*, 6:40–47.

Bastoen, J. (2015). The issue of 'identical reconstruction' on french heritage sites: Architectural cloning, alternate history and tourism. *Architecture RePerformed: The Politics of Reconstruction*, page 83.

Benoit, S., Kilouchi, S., Michel, A. et Pouyllau, S. (2010). Usines 3D. la simulation pour questionner les sources et les vestiges de l'histoire industrielle. *In Virtual Retrospect 2009*, volume 4, pages 31–40. Editions Ausonius.

Bertolini-Cestari, C., Invernizzi, S., Marzi, T. et Spano, A. (2016). Numerical survey, analysis and assessment of past interventions on historical timber structures: the roof of valentino castle. *Wiadomości Konserwatorskie.*

Besl, P. J. et McKay, N. D. (1992). Method for registration of 3-D shapes. *In Robotics-DL tentative*, pages 586–606. International Society for Optics and Photonics.

Blais, F., Rioux, M. et Beraldin, J.-A. (1988). Practical considerations for a design of a high precision 3-D laser scanner system. *In 1988 Dearborn Symposium*, pages 225–246. International Society for Optics and Photonics.

Blondel, N. (1993). *Le vitrail: vocabulaire typologique et technique.* Ministère de la Culture et de la Francophonie.

Blup (2008). L'anachronisme de l'assassin.

Boccon-Gibod, H. et Golvin, J.-C. (1990). Le grand temple d'amon-rê à karnak reconstruit par ordinateur. *Dossiers d'Archéologie (Les)*, (153):8–19.

Bogdanovych, A., Ijaz, K. et Simoff, S. (2012). The city of uruk: teaching ancient history in a virtual world. *In Intelligent Virtual Agents*, pages 28–35. Springer.

Böhler, W. et Marbs, A. (2004). 3D scanning and photogrammetry for heritage recording: a comparison. *In Proceedings of the 12th International Conference on Geoinformatics*, pages 291–298. Citeseer.

Bonneval, H. (1972). *Photogrammétrie générale*. Eyrolles.

Borel, A., Chèze, L. et Pouydebat, E. (2016). Sequence analysis of grip and manipulation during tool using tasks: A new method to analyze hand use strategies and examine human specificities. *Journal of Archaeological Method and Theory*, pages 1–25.

Boudriot, J. (1983). *Le Boullongne: vaisseau de 600. tx; 1759-1761; du constructeur G. Cambry; monographie*. Boudriot.

Bowman, D. A. (1999). *Interaction techniques for common tasks in immersive virtual environments*. Thèse de doctorat, Citeseer.

Bryon-Portet, C. (2010). Sciences humaines, sciences exactes . *Communication*, (Vol. 28/1):243–264.

Caird, J. (1996). Persistent issues in the application of virtual environment systems to training. *In Human Interaction with Complex Systems, 1996. HICS'96. Proceedings.*, pages 124–132. IEEE.

canto foundation, X. (2014). xeno-canto sharing bird sounds from around the world.

Carr, J. C., Beatson, R. K., Cherrie, J. B., Mitchell, T. J., Fright, W. R., McCallum, B. C. et Evans, T. R. (2001). Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions. *In Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 67–76. ACM.

Carrozzino, M. et Bergamasco, M. (2010). Beyond virtual museums: Experiencing immersive virtual reality in real museums. *Journal of Cultural Heritage*, 11(4):452–458.

Carrozzino, M., Evangelista, C., Bergamasco, M., Belli, M. et Angeletaki, A. (2013). Information landscapes for the communication of ancient manuscripts heritage. *In Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage), 2013*, volume 2, pages 257–262. IEEE.

Carter, J. et Covill, J. (1986). Evaluation of a diver-operated computer as a tool for underwater archaeology. *In American Academy of Underwater Sciences Sixth Annual Scientific Diving Symposium*. American Academy of Underwater Sciences (AAUS).

Cassen, S., Grimaud, V., Lescop, L., Morel, D. et Querré, G. (2014). Bienfaits et limites d'un enregistrement lasergrammétrique dans la tombe à couloir de gavrinis (morbihan, France). *established by: Mauro Cristofani and Riccardo Francovich*.

Castro-Garcia, M., Rojas-Sola, J. I. *et al.* (2015). Technical and functional analysis of albolafia waterwheel (cordoba, spain): 3d modeling, computational-fluid dynamics simulation and finite-element analysis. *Energy Conversion and Management*, 92:207–214.

CGTrader (2017). Medieval craftsman tools vr / ar / low-poly 3d model.

Challis, K. (2010). Climate change, archaeology and city modelling.

Champion, E. (2016). Entertaining the similarities and distinctions between serious games and virtual heritage projects. *Entertainment Computing*, 14:67–74.

Chaperon, T. (2002). *Segmentation de nuage de points 3D pour la modélisation automatique d'environnements industriels numérisés*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Chassay, J.-F. (2006). Texte et image: les signes piégés de la science, de la vulgarisation à la fiction. *Image [&] Narrative*, 15.

Chauviteau, A. (2016). Le cimetière des noyés à l'île d'yeu (vendée).

Chen, S., Hu, Q., Wang, S. et Yang, H. (2016). A virtual restoration approach for ancient plank road using mechanical analysis with precision 3d data of heritage site. *Remote Sensing*, 8(10):828.

Chen, Y. et Medioni, G. (1992). Object modelling by registration of multiple range images. *Image and vision computing*, 10(3):145–155.

Chevallier, R. (1969). Photogrammétrie et archéologie. *Revue Archéologique*, (Fasc. 1):121–124.

Ch'ng, E. et Gaffney, V. L. (2013). Simulation and visualisation of agent survival and settlement behaviours in the hunter-gatherer colonisation of mesolithic landscapes. *In Visual Heritage in the Digital Age*, pages 235–258. Springer.

Ch'ng, E. et Stone, R. J. (2006). 3D archaeological reconstruction and visualisation: An artificial life model for determining vegetation dispersal patterns in ancient landscapes. *In Computer Graphics, Imaging and Visualisation, 2006 International Conference on*, pages 112–118. IEEE.

Christou, C., Angus, C., Loscos, C., Dettori, A. et Roussou, M. (2006). A versatile large-scale multimodal vr system for cultural heritage visualization. *In Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '06, pages 133–140, New York, NY, USA. ACM.

Cignoni, P., Corsini, M. et Ranzuglia, G. (2008). Meshlab: an open-source 3d mesh processing system. *Ercim news*, 73(45-46):6.

Cignoni, P., Rocchini, C. et Scopigno, R. (1998). Metro: measuring error on simplified surfaces. *In Computer Graphics Forum*, volume 17, pages 167–174. Wiley Online Library.

Clevis, Q., Tucker, G. E., Lock, G., Lancaster, S. T., Gasparini, N., Desitter, A. et Bras, R. L. (2006). Geoarchaeological simulation of meandering river deposits and settlement distributions: A three-dimensional approach. *Geoarchaeology*, 21(8): 843–874.

Clini, P., Frapiccini, N., Mengoni, M., Nespeca, R. et Ruggeri, L. (2016). Sfm technique and focus stacking for digital documentation of archaeological artifacts. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pages 229–236.

Collins, B., Williams, D., Haak, R., Trux, M., Herz, H., Genevriez, L., Nicot, P., Brault, P., Coyere, X., Krause, B. *et al.* (1995). The dresden frauenkirche-rebuilding the past. *BAR International Series*, 598:19–19.

Cooper, M. (1993). The tomb of christ, jerusalem; analytical photogrammetry and 3D computer modelling for archaeology and restoration. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 29:778–778.

Corinth, S. (2011). Iron age house reconstruction - flood simulation 3D archaeology.

Cortese, M., Goellner, S., Acosta, E. G., Neufeldt, C. J., Oleksiuk, O., Lampe, M., Haselmann, U., Funaya, C., Schieber, N., Ronchi, P. *et al.* (2017). Ultrastructural characterization of zika virus replication factories. *Cell Reports*, 18(9):2113–2123.

Cotterell, B. et Kamminga, J. (1992). *Mechanics of pre-industrial technology: An introduction to the mechanics of ancient and traditional material culture*. Cambridge University Press.

Cousseau, F. (2016). *Archéologie du bâti mégalithique dans l'ouest de la France*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1.

d'Agostino, L., Guffond, C., Sartorio, G., Veissière, O. et Bryer, A. (2013). Lasergrammétrie et photogrammétrie appliquées à l'étude archéologique des châteaux médievaux: le programme franco-italien aver–des montagnes de châteaux. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, (201):13–26.

Daily, M. (1981). Use of imaging radar for geology and archeology. *In Rainbow 80; Fall Technical Meeting, Niagara Falls, NY, October 7-10, 1980, ASP Technical Papers*, pages 20–43.

Dassault (2013). Paris 3d - dassault systèmes. `https://org-www.3ds.com/paris3dorg/#Patrimoine`. (Accessed on 08/09/2017).

De Franciscis, A. (1995). Pompéï les monuments autrefois et aujourd'hui; reconstructions graphiques. *Vision s.r.l. , Roma*.

De Luca, L. (2006). *Relevé et multi-représentations du patrimoine architectural Définition d'une approche hybride pour la reconstruction 3D d'édifices*. Thèse de doctorat, Arts et Métiers ParisTech.

De Reffye, P. et Blaise, F. (1998). Coopération cirad-inria dans le cadre du laboratoire franco-chinois d'informatique, d'automatique et de mathématiques appliquées (liama).

De Reu, J., Plets, G., Verhoeven, G., De Smedt, P., Bats, M., Cherretté, B., De Maeyer, W., Deconynck, J., Herremans, D., Laloo, P. *et al.* (2013). Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science*, 40(2):1108–1121.

Debevec, P. E., Taylor, C. J. et Malik, J. (1996). Modeling and rendering architecture from photographs: A hybrid geometry-and image-based approach. *In Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 11–20. ACM.

Deleuze, G. (1983). Cinéma cours 48 du 06/12/83 - 2 transcription : Sabine mazé.

Denard, H. (2009). The london charter for the computer-based visualisation of cultural heritage. *no. February*, pages 1–13.

Deseilligny, M. P. et Clery, I. (2011). Apero, an open source bundle adjusment software for automatic calibration and orientation of set of images. *In Proceedings of the ISPRS Symposium, 3DARCH11*, volume 269277.

Deville, É. G. D. (1895). *Photographic surveying: including the elements of descriptive geometry and perspective*. Government Printing Bureau.

Devlin, K., Chalmers, A. et Brown, D. (2002). Predictive lighting and perception in archaeological representations. *In Conference proceedings of UNESCO World Heritage in the Digital Age: 30th Anniversary Digital Congress (October, 2002)*, volume 14, page 2014.

Dey, T. K. et Goswami, S. (2004). Provable surface reconstruction from noisy samples. *In Proceedings of the twentieth annual symposium on Computational geometry*, pages 330–339. ACM.

Djindjian, F. (2009). The golden years for mathematics and computers in archaeology (1965-1985). *Archeologia e calcolatori*, 20:61–73.

Doneus, M. et Neubauer, W. (2005). 3D laser scanners on archaeological excavations. *In Proceedings of the XXth International Symposium CIPA, Torino*, pages 226–231.

Drap, P. (2012). *Underwater photogrammetry for archaeology*. INTECH Open Access Publisher.

Drap, P., Durand, A., Nedir, M., Seinturier, J., Papini, O., Boucault, F., Chapman, P., Viant, W., Vannini, G. et Nuccioti, M. (2006). Towards a photogrammetry and virtual reality based heritage information system: A case study of shawbak castle in Jordan. *In Proceedings of the 7th International Conference on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage*, VAST'06, pages 67–74, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland. Eurographics Association.

Drap, P., Seinturier, J., Hijazi, B., Merad, D., Boi, J.-M., Chemisky, B., Seguin, E. et Long, L. (2015). The rov 3d project: Deep-sea underwater survey using photogrammetry: Applications for underwater archaeology. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 8(4):21.

Dunn, S., Woolford, K., Norman, S.-J., White, M. et Barker, L. (2012). Motion in place: a case study of archaeological reconstruction using motion capture. *In Revive the past: proceedings of the 39th conference in computer applications and quantitative methods in archaeology*, pages 98–106. Amsterdam University Press.

Durand, J. N. L. et Normand, C. P. J. (1819). *Précis des leçons d'architecture données à l'École Royale Polytechnique*, volume 1. Chez l'auteur, à l'École Royale Polytechnique.

Dürer, A. (1525). Underweysung der messung mit dem zirkel und richtscheyt. *Linien, Ebnen und Ganzen Corporen (Nuremberg)*.

Dutailly, B., Mora, P. et Vergnieux, R. (2012). Du bon usage de la 3D en archéologie, un point sur la photogrammétrie. *archéopages n^o 34 - juillet 2012, Inrap Eds.*, pages 86–89.

Duval-Arnould, L. (1999). Les manuscrits de la géographie de ptolémée issus de l'atelier de piero del massaio (florence, 1469-vers 1478). *In Humanisme et culture géographique à l'époque du Concile de Constance: autour du Guillaume Filastre, conference proceedings Reims*, pages 228–244.

El-Hakim, S., Gonzo, I., Voltolini, F., Girardi, S., Rizz, A., Remondino, F. et Whiting, E. (2007). Detailed 3D modelling of castles. 5(2):199–220.

Eneix, L. C. (2015). *Archaeoacoustics. The Archaeology of Sound. Publication of Proceedings from the 2014 Conference in Malta*. CreateSpace.

Fanini, B. et Ferdani, D. (2012). A new approach from 3D modelling and scanning of archaeological data to realtime online exploration. *CAA2011 - Revive the Past. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA). Proceedings of the 39th International Conference, Beijing, April 12-16.*, pages 107–115.

Faraday3d (2017). 3d architectural visualization: Best exterior renders.

Fèvres-de Bideran, J. (2013). Premier aperçu de l'histoire des images de synthèse patrimoniales. retour sur quelques expériences de restitution infographique.

Fleury, C. (2012). *Modèles de conception pour la collaboration distante en environnements virtuels distribués: de l'architecture aux métaphores*. Thèse de doctorat, INSA de Rennes.

Fleury, C., Duval, T., Gouranton, V. et Steed, A. (2012). Evaluation of remote collaborative manipulation for scientific data analysis. *In Proceedings of the 18th ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pages 129–136. ACM.

Flicketts, W., Todd, P. et Walter, N. (1989). The winsom solid modeller and its application to data. *IBM Systems Journal*, 28(4).

Forlani, M., Pietroni, E., Rescic, L., Rufa, C. et Antinucci, F. (2016). Game embrace siegecraft in" protect the walls!". *SCIRES-IT-SCIentific RESearch and Information Technology*, 6(1):31–40.

Forte, M. (2011). Cyber-archaeology: Notes on the simulation of the past. *Virtual Archaeology Review*, 2(4):7–18.

Forte, M. et Kurillo, G. (2010). Cyberarchaeology: Experimenting with teleimmersive archaeology. *In Virtual Systems and Multimedia (VSMM), 2010 16th International Conference on*, pages 155–162.

Foucault, M. (2004). Des espaces autres. *Empan*, (2):12–19.

Fourcade, H. (1903). On a stereoscopic method of photographic surveying. *Transactions of the South African Philosophical Society*, 14(1):28–35.

Franceschi, M. (2008). Application of terrestrial laser scanner to cyclostratigraphy.

Fuchs, A. (2006). *Outils numériques pour le relevé architectural et la restitution archéologique*.

Fuchs, A., Perrin, J. et Grussenmeyer, P. (2003). Confrontation de la lasergrammétrie aux techniques de relevé conventionnelles et développement d'outils numériques pour la restitution architecturale. *Télédétection et photogrammétrie pour le développement en milieu urbain*.

Fuchs, P., Moreau, G. et Arnaldi, B. (2006). Le traité de la réalité virtuelle volume 4-les applications de la réalité virtuelle.

Gabellone, F., Ferrari, I., Giannotta, M. et Dell'Aglio, A. (2013). From museum to original site: A 3d environment for virtual visits to finds re-contextualized in their original setting. *In Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage), 2013*, volume 2, pages 215–222. IEEE.

Gaitatzes, A., Christopoulos, D., Voulgari, A. et Roussou, M. (2000). Hellenic cultural heritage through immersive virtual archaeology. *In in the Proceedings of the 6th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia*, pages 4–6.

Garcia-Garcia, F., Bohorquez, P., Martinez-Sanchez, C., Perez-Valera, F., Perez-Valera, L., Calero, J. et Sanchez-Gomez, M. (2013). Stratigraphic architecture and alluvial geoarchaeology of an ephemeral fluvial infilling: climatic versus anthropogenic factors controlling the holocene fluvial evolution in southeastern spain drylands. *Catena*, 104:272–279.

Garfield, E. (2004). Systematic serendipity: finding the undiscovered answers to science questions. *Presentation at the Medical ignorance collaboratory, University of Arizona, Tucson.*

Gaugne, R., Dumont, G., Gouranton, V., Chauffaut, A. et Arnaldi, B. (2012). Infrastructures immersives ouvertes dans le cadre du projet européen visionair, exemple de la plateforme immersia. *In Les 3e Journées d'Informatique et Archéologie de Paris.*

Gaugne, R., Gouranton, V., Dumont, G., Chauffaut, A. et Arnaldi, B. (2014). Immersia, an open immersive infrastructure: doing archaeology in virtual reality. *Archeologia e Calcolatori, supplemento 5*, pages 1–10.

Gearey, B. R. et Chapman, H. P. (2006). An approach to simulating elements of palaeovegetation and some implications for the interpretation of prehistoric sites and landscapes. *Digital archaeology: bridging method and theory*, page 171.

Gholipour, V., Andaroodi, E., Ono, K. et Mokhtari, E. (2007). Modélisation par objets réutilisables: fragmentation en éléments d'une architecture de terre. application au petit caravensérail de la citadelle de bam (Iran). pages 127–133.

Giligny, F. (2011). Informatique et archéologie: une révolution tranquille? *Les historiens et l'informatique*, pages 189–198.

Giligny, F., Salanova, L., David, C., Dechezleprêtre, T., Durand, S., Grouber, P., Peake, R., Perrin, T., Pierrat, J.-M., Théron, V. *et al.* (1997). La variabilité des corpus céramiques méridionaux au néolithique final-chalcolithique. *Bulletin de la Société préhistorique française*, pages 237–258.

Girardeau-Montaut, D. (2011). Cloudcompare-open source project. *OpenSource Project.*

Goldberg, P. et Macphail, R. I. (2008). *Practical and theoretical geoarchaeology.* Blackwell Publishing.

Gosselin, L. P. (2014). Analyse des processus de recherche et de modélisation du patrimoine à partir de deux cas: l'écluse saint-gabriel du canal de lachine et la gare montreal and southern counties railways co.

Gouézin, P. (2015). Houses of the dead and natural rocks : new evidence from western France. *In* Laporte, L. et Scarre, C., éditeurs : *The Megalithic Architectures of Europe*, pages 175–182. Oxbow books.

Grammenos, D., Zabulis, X., Michel, D., Padeleris, P., Sarmis, T., Georgalis, G., Koutlemanis, P., Tzevanidis, K., Argyros, A., Sifakis, M. *et al.* (2013). A prototypical interactive exhibition for the archaeological museum of thessaloniki. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 2(1):75–99.

Grewe, K. (2010). La máquina romana de serrar piedras: la representación en bajorrelieve de una sierra de piedras de la antigüedad, en hierápolis de frigia y su relevancia para la historia técnica. *In Las técnicas y las construcciones en la ingeniería romana*, pages 381–402. Fundación de la Ingeniería Técnica de Obras Públicas.

Guarnieri, A., Vettore, A., El-Hakim, S. et Gonzo, L. (2004). Digital photogrammetry and laser scanning in cultural heritage survey. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35:154–159.

Hallert, B. (1960). *Photogrammetry: Basic Principles and General Survey.* McGraw-Hill civil engineering series. McGraw-Hill.

Harvig, L., Lynnerup, N. et Ebsen, J. A. (2012). Computed tomography and computed radiography of late bronze age cremation urns from Denmark: an interdisciplinary attempt to develop methods applied in bioarchaeological cremation research. *Archaeometry*, 54(2):369–387.

Hassmann, H., Heintges, T., Rasink, B., Winghart, S. et Wulf, F.-W. (2012). Der bronzezeitliche hortfund von gessel, stadt syke, landkreis diepholz. pages 23–28.

Haydar, M., Roussel, D., Maïdi, M., Otmane, S. et Mallem, M. (2011). Virtual and augmented reality for cultural computing and heritage: a case study of virtual exploration of underwater archaeological sites (preprint). *Virtual reality*, 15(4):311–327.

Helbing, D. et Molnar, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, 51(5):4282.

Héno, R., Borel, L., Alby, E. et Favre-Brun, A. (2010). Archéologie et photogrammétrie: les nouveaux potentiels. *Géomètre*, (2075):26–40.

Hermon, S., N. J. (2008). 3D modelling as a scientific research tool in archaeology. *Proceedings of the 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), Berlin, Germany*, pages 1–6.

Hermon, S., Niccolucci, F. et D'Andrea, A. (2005). Some evaluations on the potential impact of virtual reality on the archaeological scientific research. *In Proc. VSMM*, pages 105–14.

Hoffmeister, D. (2016). Simulation of tallow lamp light within the 3d model of the ardales cave, spain. *Quaternary International*.

Hoffmeister, D., Zellmann, S., Kindermann, K., Pastoors, A., Lang, U., Bubenzer, O., Weniger, G. et Bareth, G. (2014). Geoarchaeological site documentation and analysis of 3d data derived by terrestrial laser scanning. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2(5):173.

Hu, J., gen Wan, W. et Yu, X. (2012). A pathfinding algorithm in real-time strategy game based on unity3d. *In Audio, Language and Image Processing (ICALIP), 2012 International Conference on*, pages 1159–1162. IEEE.

Huggett, J. (2015). A manifesto for an introspective digital archaeology. *Open Archaeology*, 1(1):86–95.

Hughes, S. (2011). *CT scanning in archaeology*. INTECH Open Access Publisher.

Ingensand, H., Ryf, A. et Schulz, T. (2003). Performances and experiences in terrestrial laserscanning. *In Proceedings of the 6th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Zurich*, pages 1–8. Citeseer.

Jablonka, P., Kirchner, S. et Serangeli, J. (2002). Troiavr: A virtual reality model of troy and the troad. *CAA 2002 The Digital Heritage of Archaeology*.

Kadobayashi, R., Kochi, N., Otani, H. et Furukawa, R. (2004). Comparison and evaluation of laser scanning and photogrammetry and their combined use for digital recording of cultural heritage. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(5):401–406.

Kadobayashi, R., Neeter, E., Mase, K. et Nakatsu, R. (1999). Vista: an interactive visualization tool for archaeological data. *BAR INTERNATIONAL SERIES*, 750: 266–266.

Kalantari, M., Jung, F., Paparoditis, N. et Guédon, J.-P. (2009). Estimation automatique de l'orientation relative: une approche directe basée sur la résolution de systèmes polynomiaux multivariables. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection (SFPT)*, (189):3–16.

Kalantari, M. et Kasser, M. (2007). Implementation of a low-cost photogrammetric methodology for 3D modelling of ceramic fragments. *In XXI International CIPA Symposium, 01-06 October, Athens, Greece*, pages 79–83.

Kayumov, I. et Minchev, A. (2013). The $\kappa\alpha\mu\beta\epsilon\sigma\tau\rho\iota\upsilon$ and other roman military equipment from thracia. *In Rimska vojna oprema u pogrebnom kontekstu. Radovi XVII. ROMEC-a/Weapons and military equipment in a funerary context. Proceedings of the XVIIth Roman Military Equipment Conference*, pages 327–345. Zagreb.

Kazhdan, M., Bolitho, M. et Hoppe, H. (2006). Poisson surface reconstruction. *In Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing*, volume 7.

Kazhdan, M. et Hoppe, H. (2013). Screened poisson surface reconstruction. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 32(3):29.

Keira De Rosa, B. (2014). *Roman and late antique ceramic oil lamps in the museum of ancient cultures: atypological and compositional analysis.* Thèse de doctorat, Macquarie University, Sydney.

Kenderdine, S., Forte, M. et Camporesi, C. (2012). Rhizome of western han: an omnispatial theatre for archaeology. *CAA2011 - Revive the Past. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA). Proceedings of the 39th International Conference, Beijing, April 12-16.*, pages 141–158.

Kenyon, J. D. (2008). *Forbidden Science: From Ancient Technologies to Free Energy.* Inner Traditions/Bear & Co.

Kersten, T., Pardo, C. A. et Lindstaedt, M. (2004). 3D acquisition, modelling and visualization of north german castles by digital architectural photogrammetry. *In Proc. ISPRS XXth Congress*, pages 126–131.

Kochnev, V., Zdanovich, G. et Punegov, B. (2004). The experiment in applying 3D technology of magnetic fields interpretation at the archaeological site" arkaim". *BAR INTERNATIONAL SERIES*, 1227:64–71.

Koller, D., Frischer, B. et Humphreys, G. (2010). Research challenges for digital archives of 3D cultural heritage models. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 2(3).

Kondo, N., Watanabe, H., Sasaki, S., Imai, Y., Ishii, T., Sato, K., Shiino, S., Iida, M., Ebina, Y. et Kumazawa, H. (2010). Bringing regional heritage sites into 3D virtual environments: Cost-free data workflow and multiple 3D exhibition. *CAA2011 - Revive the Past. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA). Proceedings of the 39th International Conference, Beijing, April 12-16.*, 17:159–163.

Krasniewicz, L. (2000). Immersive imaging technologies for archaeological research. *CAA: The 28th Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, pages 163–169.

Kriek, M. et Haars, M. (2016). Bcl archaeological support - illustraties.

Landes, T. et Grussenmeyer, P. (2011). Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre: systèmes et caractéristiques. (128):37–49.

Larousse (2016). Simulation numérique.

Laycock, S. D., Bell, G. D., Mortimore, D. B., Greco, M. K., Corps, N. et Finkle, I. (2012). Combining x-ray micro-CT technology and 3D printing for the digital preservation and study of a 19$^{\text{th}}$ century cantonese chess piece with intricate internal structure. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 5(4):13.

Le Chénéchal, M., Lacoche, J., Royan, J., Duval, T., Gouranton, V. et Arnaldi, B. (2016). When the giant meets the ant an asymmetric approach for collaborative and concurrent object manipulation in a multi-scale environment. *In Collaborative Virtual Environments (3DCVE), 2016 IEEE Third VR International Workshop on*, pages 18–22. IEEE.

Le Cloirec, G. (2009). Les atouts de l'imagerie 3D pour l'archéologie de terrain. *proc. of Virtual Retrospect*, pages 29–36.

Le Corre, B. (2014). On a fait jouer un historien à « assassin's creed unity ».

Lecocq, F. (2003). Reconstitution virtuelle de rome antique. *In Robert VERGNIEUX, & Caroline DELEVOIE (Éd.), Actes du Colloque Virtual Retrospect*, pages 44–50.

Lemmens, M. (2007). Terrestrial laser scanners. *GIM international*.

Levy, R. et Dawson, P. (2006). Reconstructing a thule whalebone house using 3D imaging. *MultiMedia, IEEE*, 13(2):78–83.

Lieberwirth, U. (2008). 3D GIS voxel-based model building in archaeology. *In 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)*.

Lignola, G. P., Giamundo, V. et Cosenza, E. (2014). Numerical simulation of the seismic response of archaeological colonnade in pompeii under earthquake excitations. *In Prohitech 2014*, pages 317–322. Boğaziçi University Publishing.

Lim, C. K., Cani, M.-P., Galvane, Q., Pettre, J. et Talib, A. Z. (2013). Simulation of past life: Controlling agent behaviors from the interactions between ethnic groups. *In Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage), 2013*, volume 1, pages 589–596. IEEE.

Limp, W., Payne, A., Winters, S., Barnes, A. et Cothren, J. (2010). Approaching 3D digital heritage data from a multi-technology, lifecycle perspective. *In Proceedings of the 38th Annual International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), Granada, Spain*.

Lock, G. et Molyneaux, B. L. (2006). *Confronting scale in archaeology*. Springer.

Lorenzini, C., Carrozzino, M., Evangelista, C., Tecchia, F., Bergamasco, M. et Angeletaki, A. (2013). Serious games for disseminating the knowledge of ancient manuscripts: a case study. *SCIRES-IT-SCIentific RESearch and Information Technology*, 3(2):135–142.

Loscos, C., Tecchia, F., Frisoli, A., Carrozzino, M., Widenfeld, H. R., Swapp, D. et Bergamasco, M. (2004). The museum of pure form: touching real statues in an immersive virtual museum. *In VAST*, pages 271–279.

Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 60(2):91–110.

Lyons, T. R. et Avery, T. E. (1977). *Remote sensing. A handbook for archeologists and cultural resource managers.* Washington : Cultural Resources Management Division, National Park Service, U.S. Dept. of the Interior : for sale by the Supt. of Docs., U.S. Govt. Print. Off.

Magnenat-Thalmann, N., Papagiannakis, G., Ponder, M., Molet, T., Kshirsagar, S., Cordier, F. et Thalmann, D. (2002). Lifeplus: Revival of life in ancient pompeii. *Proc. VSMM (Virtual Systems and Multimedia).*

Maher, K. (2014). Mixamo, a company offering tools for character creation, is getting ready for gdc with new updates and a new pricing plan.

Maïm, J., Haegler, S., Yersin, B., Mueller, P., Thalmann, D. et Van Gool, L. (2007). Populating ancient pompeii with crowds of virtual romans. *In Proceedings of the 8th International Symposium on Virtual Reality, Archeology and Cultural Heritage-VAST*, numéro VRLAB-CONF-2008-151.

Mandelbrot, B. B. (1967). How long is the coast of britain. *Science*, 156(3775):636–638.

Martinez, J. (2007). La reconstitution de la colonne des danseuses de delphes. *R. Vergnieux et C. Delevoie (éd.), Virtual Retrospect*, pages 231–238.

Masuda, T., Yamada, Y., Kuchitsu, N. et Ikeuchi, K. (2006). Sunlight illumination simulation for archaeological investigation: case study of the fugoppe cave. *In Proceedings of the Tenth International Conference on Virtual Systems and Multimedia: Hybrid Realities & Digital Partners. Explorations in Art, Heritage, Science & the Human Factor (17-19 November 2004, Softopia Japan, Ogaki City, Japan)(ed. H. Thwaites). IOS Press, Amsterdam*, pages 850–859.

Matsumoto, K. et Ono, I. (2009). Improvements of archaeological excavation efficiency using 3D photography and total stations. *22nd CIPA Symposium, October 11-15, 2009, Kyoto, Japan.*

Maumont, M. (2010). L'espace 3D: de la photogrammétrie à la lasergrammétrie. *In Situ. Revue des patrimoines*, (13).

Merlot, O. (2015). Le jeu vidéo et le patrimoine culturel architectural : vers un nouvel outil de médiation culturelle ? l'exemple de la reconstitution de deux ensembles architecturaux à valeur patrimoniale. Mémoire de D.E.A.

Millon, H. et Lampugnani, V. (1997). *The Renaissance from Brunelleschi to Michelangelo: The Representation of Architecture*. St Martins Press.

Morgan, C. L. (2009). (re) building çatalhöyük: Changing virtual reality in archaeology. *Archaeologies: Journal of the World Archaeological Congress*, pages 468–487.

Mori, M. (1970). Bukimi no tani [the uncanny valley]. energy, 7 (4) 33-35.(translated by karl f. macdorman and takashi minato in 2005 within appendix b for the paper androids as an experimental apparatus: Why is there an uncanny and can we exploit it? *In Proceedings of the CogSci-2005 Workshop: Toward Social Mechanisms of Android Science*, pages 106–118.

Müller, P., Vereenooghe, T., Wonka, P., Paap, I. et Van Gool, L. J. (2006). Procedural 3D reconstruction of puuc buildings in xkipché. *In VAST*, pages 139–146. Citeseer.

Musse, S. R. et Thalmann, D. (2007). *Crowd Simulation*. New York: Springer.

Negroni Catacchio, N. et Cardosa, M. (2002). Imago etruriae. una ricostruzione in 3d del paesaggio antico in etruria: il caso di sovana. *Multimedia Communication for Cultural Heritage, Budapest, Archaeolingua*.

Neubauer, W. et Doneus, M. (2008). Digital recording of stratigraphic archaeological excavations using terrestrial 3D laser scanners. *ViaVIAS*, 2:45–52.

Niccolucci, F. et Richards, J. D. (2013). Ariadne: advanced research infrastructures for archaeological dataset networking in europe. *International Journal of Humanities and Arts Computing*, 7(1-2):70–88.

Nicolae, C., Nocerino, E., Menna, F. et Remondino, F. (2014). Photogrammetry applied to problematic artefacts. *ISPRS-Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci*, 1:451–456.

Nicolas, T., Gaugne, R., Tavernier, C., Gouranton, V. et Arnaldi, B. (2016). La tomographie, l'impression 3d et la réalité virtuelle au service de l'archéologie. *Les Nouvelles de l'archéologie*, (146):16–22.

Nicolas, T., Gaugne, R., Tavernier, C., Petit, Q., Gouranton, V. et Arnaldi, B. (2015). Touching and interacting with inaccessible cultural heritage. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 24(3):265–277.

Ohtake, Y., Belyaev, A., Alexa, M., Turk, G. et Seidel, H.-P. (2005). Multi-level partition of unity implicits. *In ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, page 173. ACM.

Olson, B. R., Gordon, J. M., Runnels, C. et Chomyszak, S. (2014). Experimental three-dimensional printing of a lower palaeolithic handaxe: an assessment of the technology and analytical value. *Lithic Technology*, 39(3):162–172.

Ören, T. (2011). A critical review of definitions and about 400 types of modeling and simulation. *SCS M&S Magazine*, 2(3):142–151.

Paipetis, S. et Ceccarelli, M. (2010). *The Genius of Archimedes – 23 Centuries of Influence on Mathematics, Science and Engineering: Proceedings of an International Conference held at Syracuse, Italy, June 8-10, 2010*. History of Mechanism and Machine Science. Springer Netherlands.

Palmer, R. (1977). A computer method for transcribing information graphically from oblique aerial photographs to maps. *Journal of Archaeological Science*, 4(3):283–290.

Panerai, P., Demorgon, M. et Depaule, J.-C. (1999). *Analyse urbaine*. Parenthèses Marseilles.

Panzoli, D., Peters, C., Dunwell, I., Sanchez, S., Petridis, P., Protopsaltis, A., Scesa, V. et de Freitas, S. (2010). A level of interaction framework for exploratory learning with characters in virtual environments. *In Intelligent Computer Graphics 2010*, pages 123–143. Springer.

Paola, M. (2001). Alberti (leon battista). descriptio urbis romœ. édition critique, traduction et commentaire par martine furno et mario carpo. *Revue belge de philologie et d'histoire*, 79(3):1037–1039.

Pelerin, J. et Jousse, M. (1635). *La Perspective positive de Viator: Latine et Françoise*. George Griveau.

Père, C. (2006). Parcours d'un ingénieur: entre rêve estudiantin et réalité industrielle.

Pescarin, S., Calori, L., Camporesi, C., Ioia, M. D., Forte, M., Galeazzi, F., Imboden, S., Moro, A., Palombini, A., Vassallo, V. et Vico, L. (2008). Back to 2nd AD A VR on-line experience with Virtual Rome Project. *In* Ashley, M., Hermon, S., Proenca, A. et Rodriguez-Echavarria, K., éditeurs : *VAST: International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage*. The Eurographics Association.

Pihel, J., Ode-Sang, Å., Hägerhäll, C., Nyström, M. et Sandström, E. (2014). Assessments and eye movements compared between photographs and visualizations of logged forest vistas. for what kind of assessments are visualisations a good representation of photographs? girot/grêt-regamey/wissen hayek/fricker/buhmann. *Peer reviewed proceedings digital landscape architecture 2014*.

Pinol, J.-L. (2011). Une infrastructure pour les shs : le tge adonis. *Revue d'histoire moderne et contemporaine 5/2011 (n° 58-4bis)*, pages 90–100.

Pitzalis, D. (2011). *3D-COFORM: Making 3D documentation an everyday choice for the cultural heritage sector*. Sociedad Española de Arqueología Virtual.

Pletinckx, D. (2009). Virtual archaeology as an integrated preservation method. *Arqueologica 2.0, Proceedings of 1st International Meeting on Graphic Archaeology and Informatics, Cultural Heritage and Innovation*, pages 51–55.

Poivilliers, G. (1922). Sur un nouveau stéréoautograph. *Comptes Rendues*, 175:752–55.

Pomaska, G. (2009). Utilization of photosynth point clouds for 3D object reconstruction. *In Proceedings of the 22nd CIPA symposium, Kyoto, Japan.*

Potenziani, M., Callieri, M., Dellepiane, M., Corsini, M., Ponchio, F. et Scopigno, R. (2015). 3dhop: 3d heritage online presenter. *Computers & Graphics*, 52:129–141.

Poux, F. (2014). Vers de nouvelles perspectives lasergrammétriques : optimisation et automatisation de la chaîne de production de modèles 3D. Mémoire de D.E.A., Université de Liege - Belgique.

Prins, A. et Adams, M. J. (2012). Practical uses for photogrammetry on archaeological excavations. *Jezreel Valley Regional Project: JVRP White Papers in Archaeological Technology.*

Prusinkiewicz, P., Hammel, M., Mech, R. et Hanan, J. (1995). The artificial life of plants. *Artificial life for graphics, animation, and virtual reality*, 7:1–1.

Pujol-Tost, L. (2011). Realism in virtual reality applications for cultural heritage. *International Journal of Virtual Reality*, 10(3):41.

Pujol Tost, L. et Sureda Jubrany, M. (2007). Vers une réalité virtuelle véritablement interactive.

Pulfrich, C. (1902). *Über neuere Anwendungen der Stereoskopie und über einen hierfür bestimmten Stereo-Komparator.* Springer.

Rageul, N. (2007). *Vers une optimisation du processus d'analyse en ligne de données 3D: cas des fouilles archéologiques.* Thèse de doctorat, Université Laval.

Ramírez, P. B., de Balbín Behrmann, R., Laporte, L., Gouézin, P., Cousseau, F., Bermejo, R. B., Gismero, A. H., Cela, M. I. et Quesnel, L. (2015). Natural and artificial colours: the megalithic monuments of brittany. *Antiquity*, 89(343):55–71.

Raymond, P. et Sauliere, N. (2009). Apport de la modélisation et de l'animation tridimensionnelle dans la compréhension des objets et des techniques archéologiques. *In Actes du Colloque Virtual Retrospect*, pages 65–72.

Reda, I. (2010). Solar eclipse monitoring for solar energy applications using the solar and moon position algorithms.

REDACTIONNDA (2013). Le financement de l'archéologie. *Les nouvelles de l'archéologie*, (133):3–4.

REILLY, P. (1990). Computer animation of a csg virtual archaeological site.

REILLY, P. (1991). Towards a virtual archaeology. *In CAA 90*.

REMONDINO, F., DEL PIZZO, S., KERSTEN, T. P. et TROISI, S. (2012). Low-cost and open-source solutions for automated image orientation–a critical overview. *In Euro-Mediterranean Conference*, pages 40–54. Springer.

RESCO, P. et FIGUEIREDO, C. (2014). Escala de evidencia histórica | scale of historical evidence.

REUTER, P., RIVIERE, G., COUTURE, N., MAHUT, S. et ESPINASSE, L. (2010). Archeotui-driving virtual reassemblies with tangible 3d interaction. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 3(2):4.

REYNOLDS, C. W. (1999). Steering behaviors for autonomous characters. *In Game developers conference*, volume 1999, pages 763–782.

RIDEL, B., REUTER, P., LAVIOLE, J., MELLADO, N., COUTURE, N. et GRANIER, X. (2014). The revealing flashlight: Interactive spatial augmented reality for detail exploration of cultural heritage artifacts. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 7(2):6.

RINAUDO, F., CHIABRANDO, F., LINGUA, A. M. et SPANÒ, A. T. (2012). Archaeological site monitoring: UAV photogrammetry can be an answer. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39(B5): 583–588.

RIOUX, M. (1984). Laser range finder based on synchronized scanners. *Applied optics*, 23(21):3837–3844.

ROBERT, P. (1988). Dictionnaire de la langue française. *Paris: Le Robert*.

ROCCASECCA, P. (2006). Notice sur de artificiali perspectiva.

RODRIGUEZ, S., DENNY, J., ZOURNTOS, T. et AMATO, N. M. (2010). Toward simulating realistic pursuit-evasion using a roadmap-based approach. *In Motion in Games*, pages 82–93. Springer.

ROUSSEAUX, F. et THOUVENIN, I. (2009). Exploring informed virtual sites through michel foucault's heterotopias. *International Journal of Humanities and Arts Computing*, 3(1-2):175–191.

ROUSSOU, M. et DRETTAKIS, G. (2003). Photorealism and non-photorealism in virtual heritage representation. *In First Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage (2003)*, page 10. Eurographics.

Rueff, B. (2016). Lamps and architecture : an archaeology of lighting in the cities of malia and kommos (crete) during bronze age. *In Proceedings of the International Symposium on Lychnology "Lighting Sibiu"*.

Sá, A. M., Rodriguez-Echavarria, K., Griffin, M., Covill, D., Kaminski, J. et Arnold, D. B. (2012). Parametric 3d-fitted frames for packaging heritage artefacts. *In VAST*, pages 105–112.

Saint-Aubin, J. (1992). *Le relevé et la représentation de l'architecture*. Documents & méthodes - Inventaire général des monuments et des richesses artistiques de la France. Inventaire général.

Santacana i Mestre, J. et Carme Belarte Franco, M. (2005). Idées et débats de la restitution en archéologie, problèmes généraux concernant la restitution en archéologie. *Centre des Monuments Nationaux, Editions du Patrimoine*, pages 6–10.

Scarre, C. et Lawson, G. (2006). *Archaeoacoustics*. McDonald Inst of Archeological.

Scherer, M. (2002). About the synthesis of different methods in surveying. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS Archives)*, 34(5/C7):423–429.

Shao, W. et Terzopoulos, D. (2005). Autonomous pedestrians. *In Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, SCA '05, pages 19–28, New York, NY, USA. ACM.

Sideris, A. (2008). Recontextualised antiquity: Interpretative vr visualization of ancient art and architecture. *In Proceedings: International Symposium on" Information and Communication Technologies in Cultural Heritage", Ioannina*, pages 16–18.

Slama, C. C., Theurer, C., Henriksen, S. W. *et al.* (1980). *Manual of photogrammetry*. Numéro Ed. 4. American Society of photogrammetry.

Smith, J. (1964). Systematic serendipity. *Chemical & Engineering News*, 42(35):55–56.

Smith, M. J., Koubek, R. J., Salvendy, G. et Harris, D. (2001). *Usability Evaluation and Interface Design: Cognitive Engineering, Intelligent Agents, and Virtual Reality*, volume 1. CRC press.

Smith, N. et Levy, T. (2014). Archfield: a digital application for real-time acquisition and disseminationâĂŤfrom the field to the virtual museum. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 14(4):65–74.

Smith, N. G., Knabb, K., DeFanti, C., Weber, P., Schulze, J., Prudhomme, A., Kuester, F., Levy, T. E. et DeFanti, T. A. (2013). Artifactvis2: Managing real-time archaeological data in immersive 3d environments. *In Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage), 2013*, volume 1, pages 363–370. IEEE.

Snavely, N., Seitz, S. M. et Szeliski, R. (2008). Modeling the world from internet photo collections. *International Journal of Computer Vision*, 80(2):189–210.

Staiger, R. (2011). 10 years of terrestrial laser scanning technology, systems and applications. *Geosiberia*.

Stelzner, J., Ebinger-Rist, N., Peek, C. et Schillinger, B. (2010). The application of 3D computed tomography with x-rays and neutrons to visualize archaeological objects in blocks of soil. *Studies in Conservation*, 55(2):95–106.

Suchanek, T. (1998). 3D editor for archeology.

Summerhayes, G. R., Leavesley, M., Fairbairn, A., Mandui, H., Field, J., Ford, A. et Fullagar, R. (2010). Human adaptation and plant use in highland new Guinea 49,000 to 44,000 years ago. *Science*, 330(6000):78–81.

Sundstedt, V., Chalmers, A. et Martinez, P. (2004). High fidelity reconstruction of the ancient Egyptian temple of kalabsha. *In Proceedings of the 3rd international conference on Computer graphics, virtual reality, visualisation and interaction in Africa*, pages 107–113. ACM.

Talboys, D. (2010). *The Stonehenge Observatory*. Smashwords Edition.

Tan, A. H., Hao, S., Li, J., Zhao, L. et Tan, F. H. (2015). Visual modeling of chinese temple construction for student education. *In Proceedings of the ASEE's 122nd Annual Conference and Exposition*, Seattle, Washington. ASEE Conferences. https://peer.asee.org/25044.

Tan, A. H. et Tan, F. H. (2015a). A course in history of ancient engineering. *In Proceedings of the ASEE's 122nd Annual Conference and Exposition*, Seattle, Washington. ASEE Conferences. https://peer.asee.org/25044.

Tan, A. H. et Tan, F. H. (2015b). Digital graphics and virtual reality for the presentation of ancient roman construction techniques. *In Proceedings of the ASEE's 122nd Annual Conference and Exposition*, Seattle, Washington. ASEE Conferences. https://peer.asee.org/25044.

Tang, S.-K. et Liu, Y.-T. (2002). A digital reconstruction procedure for a disappeared city space and its activities. *In Proceedings of the Twentieth Conference on Education in Computer Aided Architecture Design in Europe*, volume 2002, pages 598–603.

Thibault, G. et Smadja, S. (1996). Travailler dans une centrale virtuelle. *La Recherche*, pages 26–28.

Thompson, F. V. (1908). Stereo-photo surveying. *The Geographical Journal*, 31(5):534–549.

Universalis, E. (1986). *Les événements, les hommes, les problèmes en 1985*. Encyclopaedia universalis France.

Universalis, E. (1995). *corpus 15*. Paris : Edition Messiaen - Matalité.

van Beek, R., Gouw-Bouman, M. et Bos, J. (2015). Mapping regional vegetation developments in twente (the netherlands) since the late glacial and evaluating contemporary settlement patterns. *Netherlands Journal of Geosciences*, 94(03):229–255.

Varea, S. (2006). Photogrammétrie et muséologie – les sèvres du musée de rouen. *Revue XYZ*, (108):23–30.

Vergnieux, R. (2011). Virtual archaeological research and 3D models (restitution, validation and simulation)/l'usage scientifique des modèles 3D en archéologie, de la validation à la simulation. *Virtual Archaeology Review*, 2(4):39–43.

Vosinakis, S. et Avradinis, N. (2015). Session 6 – virtual archaeology, museums and the new narratives. *Ioannis Liritzis University of the Aegean, GR Arne Flaten Ball State University Susan Bergeron*, 23:64.

Vozikis, G., Haring, A., Vozikis, E. et Kraus, K. (2004). *Laser scanning: a new method for recording and documentation in archaeology*. na.

Wehr, A. et Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning – an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2):68–82.

Wells, A. E. (2008). *Virtual reconstruction of a seventeenth-century Portuguese nau*. Thèse de doctorat, Texas A&M University.

Whittlesey, J. (1966). Photogrammetry for the excavator. *Archaeology*, 19(4):273–276.

Wikipedia (2016a). Anastylose.

Wikipedia (2016b). Archaeological site. [Online; accessed 12-November-2016].

Wilkinson, M., Jones, R., Woods, C., Gilment, S., McCaffrey, K., Kokkalas, S. et Long, J. (2016). A comparison of terrestrial laser scanning and structure-from-motion photogrammetry as methods for digital outcrop acquisition. *Geosphere*, 12(6):1865–1880.

Wong, C. (2012). Studio project for arch 531 / mcgill university / school of architecture / fall 2012 - ivy's map of rome.

Wright, E. (2012). Deep star maps - nasa scientific visualization studio.

Wu, C. *et al.* (2011). Visualsfm: A visual structure from motion system.

XfrogPlants (2015). 3d plant, tree and flowers models.

Yang, K., Jie, J. et Haihui, S. (2011). Study on the virtual natural landscape walk-through by using unity 3D. *In VR Innovation (ISVRI), 2011 IEEE International Symposium on*, pages 235–238. IEEE.

Zabulis, X., Grammenos, D., Sarmis, T., Tzevanidis, K. et Argyros, A. (2010). Exploration of large-scale museum artifacts through non-instrumented, location-based, multi-user interaction. *In Proceedings of the 11th International Conference on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, VAST'10, pages 155–162, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland. Eurographics Association.

Zendjebil, I., Ababsa, F.-E., Didier, J.-Y., Vairon, J., Frauciel, L., Hachet, M., Guitton, P. et Delmont, R. (2008). Outdoor augmented reality: State of the art and issues. *In 10th ACM/IEEE Virtual Reality International Conference (VRIC 2008)*, pages 177–187.

Zotti, G. (2016). Archaeoastronomical simulations in a desktop planetarium. *Proc. CHNT2015. Edited by Wolfgang Börner. TO APPEAR.*

Zyda, M. (2005). From visual simulation to virtual reality to games. *Computer*, 38(9): 25–32.

Table des figures

1 Représentations de l'implication du corps du scientifique au sein des films *La Mouche* (David Cronenberg) et *Indiana Jones et le Temple maudit* (Steven Spielberg) 1

1.1 Organisation schématique des thématiques développées dans le chapitre 1 "État de l'art : 3D et archéologie" 4

1.2 Plan dessiné à la main (à gauche) comparé à un plan tracé par ordinateur à partir de photos aériennes de site archéologique (à droite) (Palmer, 1977) 5

1.3 Vues 3D de morceaux d'épave (Carter et Covill, 1986) 6

1.4 1 : Temple d'Amon-Rê à Karnak (Boccon-Gibod et Golvin, 1990) / 2 : Cathédrale saxonne de Winchester (Flicketts *et al.*, 1989) / 3 : Abbaye de Cluny (film *Mémoires de pierres*) (Père, 2006) 6

1.5 Église Notre-Dame de Dresde avant et après destruction et reconstruction 3D (Collins *et al.*, 1995) 6

1.6 Cliché vertical de la chapelle de la tombe de Zacharie (Jérusalem) / écorché filaire de l'édicule / édicule actuel / rendu au lancer de rayon d'une modélisation de l'édicule (Cooper, 1993) 7

1.7 Numérisations et modélisations de châteaux en Italie du Nord (El-Hakim *et al.*, 2007) et au nord-ouest de l'Allemagne (Kersten *et al.*, 2004) . . . 7

1.8 Expérience de Brunelleschi (Millon et Lampugnani, 1997) 9

1.9 Châssis à réseau de Dürer (Dürer, 1525) 10

1.10 Reproduction d'un plan de Rome d'Alberti (Alberti, 1553), cercle d'Alberti permettant de référencer des points de Rome, carte de Rome dressée selon les concepts d'Alberti par Pietro del Massaio en 1469 (Duval-Arnould, 1999) et exemple de liste de points (Wong, 2012) 11

1.11 Méthode de dessin en perspective en saisie continue (Dürer, 1525) 11

1.12 Perspective à deux points de fuite de Jean Pèlerin (Pelerin et Jousse, 1635) 12

1.13 Photo aérienne et levé photogrammétrique de la zone du théâtre de la cité antique de Djemila (Algérie) effectué dans les années 1960 (Chevallier, 1969) 13

1.14 Illustration géométrique, différentes étapes d'un algorithme de calcul de l'orientation relative et des équations de coplanarité (Kalantari *et al.*, 2009) 14

1.15 Photogrammétrie appliquée à la fouille archéologique : prise de vue dans les années 1960 (Whittlesey, 1966), orthophotographie (Matsumoto et Ono, 2009), avec relevé pierre à pierre (Prins et Adams, 2012) et géoréférencée (Rinaudo *et al.*, 2012) 15
1.16 Rendus filaires issus de photogrammétrie des vestiges de la grotte de la momie (Canyon del Muerto - Arizona) (1) et du site Navajo Kin Bineola (Nouveau-Mexique) (2) (Lyons et Avery, 1977) 15
1.17 Modèle 3D issu de photogrammétrie de la tour de l'horloge de Berkeley, de l'Arc de triomphe et du Taj Mahal (Debevec *et al.*, 1996) 15
1.18 Modèle 3D issu de photogrammétrie du temple 'G1' de My Son (Vietnam) (Barazzetti *et al.*, 2011) 16
1.19 Modèles 3D issu de photogrammétrie du château d'Ajlun (Jordanie) (Al-Adamat *et al.*, 2016), de l'église de San Sebastián de los Caballeros (Espagne) (Baños *et al.*, 2016) et de l'église d'Antiphonitis (Chypre du Nord) (Abate *et al.*, 2016) 16
1.20 Photogrammétrie sur l'épave du Grand Ribaud (haut) (Drap, 2012) et sur une épave au large du Cap Bénat (profondeur 4328m, 12000 photos, 250 millions de points) (Drap *et al.*, 2015) 17
1.21 Photogrammétrie sur fragments de céramique (1) (Kalantari et Kasser, 2007) et artefact (2) (Nicolae *et al.*, 2014) 17
1.22 Impression 3D d'un biface acheuléen (Olson *et al.*, 2014), d'une statuette de centaure à différentes échelles (Nicolas *et al.*, 2016) et d'un essai d'emballage pour artefact fragile (Sá *et al.*, 2012) 18
1.23 Principe de la triangulation (Poux, 2014) 19
1.24 Relation permettant d'obtenir la différence de phase $\Delta\phi$ du laser utilisant la technique du même nom 19
1.25 Relevé laser sur une fouille de l'oppidum de Burg (Autriche) (1) (Doneus et Neubauer, 2005), d'une coupe stratigraphique en Italie (2) (Franceschi, 2008) et d'un site urbain à Leipzig (3) (Neubauer et Doneus, 2008) . . . 20
1.26 Relevé laser du théâtre de Dionysos (1) (Vozikis *et al.*, 2004), du château de Slanec (Slovaquie) (2) (Bartoš *et al.*, 2011), de Graines (Italie) (3) (d'Agostino *et al.*, 2013) et nuage de points de l'abbaye territoriale d'Einsiedeln (Suisse) (4) (Ingensand *et al.*, 2003) 21
1.27 Relevé laser de l'église Sainte-Marie de Staines (Italie) (Barrile *et al.*, 2016), du pont baroque de Královà pri Senci et de la ville de Banská Łtiavnica (Slovaquie) (d'Agostino *et al.*, 2013) 21
1.28 Algorithme glouton faisant épouser itérativement une Fonction de Base Radiale sur un nuage de points (Carr *et al.*, 2001) 23
1.29 Reconstruction en 2D par l'algorithme de Poisson (Kazhdan *et al.*, 2006) 23
1.30 Reconstruction en 3D du lapin de Stanford par les méthodes Power Crust (Kazhdan *et al.*, 2006), Robust Cocone (Dey et Goswami, 2004), Fast RBF (Carr *et al.*, 2001), MPU (Ohtake *et al.*, 2005) et reconstruction de Poisson (Kazhdan *et al.*, 2006) 24

1.31 Anastylose virtuelle de la colonne des danseuses de Delphes (Martinez, 2007) . . . 25
1.32 Réassemblage, impression 3D et positionnement d'un buste d'une Madonne détruite par un tremblement de terre (Arbace *et al.*, 2013) 25
1.33 Figurine anthropomorphe de Shaar Hagolan / section longitudinale / radiographie / section sur plan coronal / section et détection d'une anomalie (Applbaum et Applbaum, 2005) . . . 28
1.34 Radiographie sur un bloc de terre issu de la nécropole de Villalfonsina (Italie) et ceinture métallique extraite (Stelzner *et al.*, 2010) . . . 29
1.35 Urne funéraire de Rishøjen (péninsule du Jutland / Danemark) / écorché de la numérisation par tomodensitométrie de l'urne et des restes d'os contenus / vue en coupe / volume 3D du contenu incinéré (Harvig *et al.*, 2012) . . . 29
1.36 Momie égyptienne numérisée au département de radiologie de l'hôpital St Thomas de Londres en 1991 / ajustement des plages de valeurs des pixels affichés / reconstruction 3D de la moitié inférieure de la tête / coupe au niveau de l'abdomen / étapes de dessin d'une reconstitution à partir d'une vue 3D du crâne (Hughes, 2011) . . . 30
1.37 Objets en or de l'Âge du bronze découverts à Gessel (Allemagne) / tomodensitométrie effectuée à l'Université Gottfried Wilhelm Leibniz de Hanovre / radioscopie (société YXLON) / impression 3D (Hassmann *et al.*, 2012) . . . 30
1.38 Pièce d'un jeu d'échecs cantonais sculpté dans l'ivoire en 1880 / microtomographie aux rayons X / impression 3D (Laycock *et al.*, 2012) . . . 30
1.39 Typologies de portiques (Durand et Normand, 1819) et de tissus urbains (Panerai *et al.*, 1999) . . . 31
1.40 Ordres grecs et romains : dorique, ionique, corinthien, toscan, dorique romain et composite . . . 32
1.41 Plan, élévation, axonométrie et vue en perspective de la maison des bûcherons de Claude Nicolas Ledoux (Aubert, 1982) . . . 33
1.42 Modèles de travail de la ville d'Amarna (version V1/V2) et du phare d'Alexandrie (version V1) (Vergnieux, 2011) (haut) / Plan datant de 1845 et vue en plongé direction Nord-Ouest de la restitution 3D de l'écluse montréalaise Saint-Gabriel (Gosselin, 2014) (bas) . . . 36
1.43 Reconstitutions 3D d'une rue pompéienne sans validation (De Franciscis, 1995) et de la porte royale du château de Versailles dans un XVIII^{e} siècle idéalisé (Bastoen, 2015) . . . 37
1.44 1 : Drapeau turc du XIX^{e} siècle dans le jeu vidéo *Assassin's Creed* (1191) (Blup, 2008) / 2 : Bureau de tabac du XX^{e} siècle dans le jeu vidéo *Assassin's Creed Unity* (Révolution française) (Le Corre, 2014) / Rose de la façade ouest de Notre-Dame de Paris sur le monument existant (3), dans *Paris 3D Saga* (4) (Dassault, 2013) et dans le jeu vidéo *Assassin's Creed Unity* (5) (Merlot, 2015) . . . 38

2.1 Organisation schématique des thématiques développées dans le chapitre 2 "État de l'art : Simulation visuelle hors ligne et réalité virtuelle en archéologie" 40
2.2 Représentation sur un sarcophage en pierre et simulation de la scierie de pierre romaine de Hiérapolis (IIIe après J.-C) (Grewe, 2010) 42
2.3 Simulation d'une hypothèse de construction de Stonehenge (Talboys, 2010), modèle de travail sur le mécanisme d'une machine hydraulique romaine (Vergnieux, 2011) et système de levage d'Archimède (Tan et Tan, 2015a) 42
2.4 Gauche : Modèle CAO du moulin romain de la Albolafia (Espagne) et simulation de la dynamique d'écoulement de l'eau (Castro-Garcia *et al.*, 2015) / Droite : Simulation d'impacts du tremblement de terre sur un portion de colonnade du Forum de Pompeii et cartes de répartition d'efforts de traction (Lignola *et al.*, 2014) 43
2.5 Gauche : Rampe, portique et machines de levage de l'obélisque du Circus Maximus (aquarelle et modélisation) / Milieu : Hypothèse de déroulement de toiles en quinconce au-dessus du Colisée / Droite : Reconstitution d'un système de treuil manœuvré par les marins d'une flotte impériale (Lecocq, 2003) 43
2.6 Numérisation de l'actuel chemin en planches Chiya (Wangjialeng, Chine), estimation de la profondeur de trou, portion et coupe schématiques restituées, restitutions photoréalistes prenant en compte les simulations mécaniques (Chen *et al.*, 2016) 44
2.7 Débitage Levallois à pointe et à éclat préférentiel, mécanisme de pieuserrure (Chelles) (Raymond et Sauliere, 2009), outils artisanaux médiévaux issus d'une plateforme de distribution de modèles 3d en ligne (CGTrader, 2017), horloges de Su Song (réduite), de Galilée et dioptre de Héron d'Alexandrie (Tan et Tan, 2015a) 45
2.8 Moteur à torsion d'une arme de jet, catapulte et balistes (Paipetis et Ceccarelli, 2010) (Kayumov et Minchev, 2013), beffroi, oxybèle et gastrophète (Forlani *et al.*, 2016) 45
2.9 Haut : Squelette de baleine, sa numérisation et la simulation d'équilibre du faîtage d'une maison Thulé en os de baleine (Levy et Dawson, 2006) / Bas : Installation, raccordement des poutres périmétriques (Pingban Fang) et assemblage d'un Shang Ang Puzuo (type dougong) au sein d'un modèle 3D de temple chinois (Tan *et al.*, 2015) 46
2.10 Simulations procédurales de constructions Puuc à Xkipché (Yucatán - Mexique) à partir de grammaires de formes architecturales (Müller *et al.*, 2006). 46
2.11 1 : Dessin et restitution du haut-fourneau de Marcenay (Côte-d'Or) (Benoit *et al.*, 2010) / 2 : Grue antique (Tan et Tan, 2015b) / Traité de distillation médicinale du XVI^{e} siècle (3) (Carrozzino *et al.*, 2013) et simulations temps réel et interactives d'une machine restituée (4) (Lorenzini *et al.*, 2013) (Champion, 2016) 47

2.12 Hiéroglyphes du temple de Kalabsha éclairés par un éclairage moderne et une lampe à l'huile (de sésame) (Sundstedt *et al.*, 2004) / Maison des Vettii (Pompéi) éclairage moderne et à lampe à huile (d'olive) (Devlin *et al.*, 2002) 48
2.13 Simulations d'éclairage sur le cheval de l'abri de Cap Blanc (Devlin *et al.*, 2002) 48
2.14 Simulation d'éclairages dans une maison médiévale (Devlin *et al.*, 2002) 49
2.15 Résultat de la simulation d'éclairage dans la grotte Fugoppe (à lumière naturelle au solstice d'été) (Masuda *et al.*, 2006) et dans la grotte espagnole d'Ardales (lampe à suif) (Hoffmeister, 2016) 50
2.16 Étude d'éclairage solaire dans le Circus Maximus de Rome au IV^{e} siècle (Vergnieux, 2011) et de l'alignement du soleil au solstice d'été avec l'entrée d'un site néolithique (Zotti, 2016) 50
2.17 Simulation de couches stratigraphiques et d'artefact du site archéologique imaginaire *Grafland* (Reilly, 1991) 51
2.18 Analyses spatiales métriques 3D appliquées à l'archéologie (Rageul, 2007) 52
2.19 Simulation 3D de la susceptibilité magnétique du sous-sol du site archéologique Arkaïm (Russie) (Kochnev *et al.*, 2004), relations entre particularités géologiques du site Akroterion à Cythère (Lieberwirth, 2008) et assemblage de plusieurs sources de données 3D autour de la grotte espagnole d'Ardales (Hoffmeister *et al.*, 2014) 52
2.20 Simulation d'inondation d'une maison à l'âge du fer (Corinth, 2011) / Crue autour de la tour de Clifford (York) en 2002 (Challis, 2010) 53
2.21 Répartition d'éléments archéologique dans une plaine inondable (Clevis *et al.*, 2006) et dépôts d'eau douce autour d'un abri sous roche du canyon de la Segura (fleuve espagnol) durant des paléo-inondations occasionnelles (Garcia-Garcia *et al.*, 2013) 54
2.22 Arbre 3D réalisé grâce au logiciel AMAP (De Reffye et Blaise, 1998), interface du SIG, reconstitution du site archéologique étrusque *Area Archeologica di Sovana* à l'Âge du Bronze ancien et final (Negroni Catacchio et Cardosa, 2002) 54
2.23 Évolution de l'Aulne sur le site de l'Âge du fer *Sutton Common* (Gearey et Chapman, 2006) / évolution d'un paysage du Mésolithique selon des changements saisonniers et écologiques (Ch'ng et Stone, 2006) 55
2.24 Cartes de végétation et rendus 3D de la Twente (région orientale des Pays-Bas) au nouveau Dryas (-10000), Atlantique (-4000), Subboréal (-1500) et au Subatlantique (200) (van Beek *et al.*, 2015) 55
2.25 Simulations de scènes pompéiennes dans une boulangerie en temps réel, non réel et de résidences en réalité mixte. (Magnenat-Thalmann *et al.*, 2002) 56
2.26 Reconstitution d'une cérémonie funéraire inca (Lecocq, 2003) / photographie et reconstitution virtuelle d'un poste d'opération chez Renault (Benoit *et al.*, 2010). 57

2.27 Rendus de simulations de scènes non sourcées ni documentées (Kriek et Haars, 2016) 57
2.28 Simulation de piétons au sein d'une gare virtuelle *Pennsylvania Station* de New York (Shao et Terzopoulos, 2005) / foule de Romains virtuels dans une rue de l'ancienne Pompéi (Maïm *et al.*, 2007). 58
2.29 Projet *Roma Nova* (Panzoli *et al.*, 2010) / simulation des habitants de la ville d'Uruk (Bogdanovych *et al.*, 2012). 59
2.30 Simulation de communautés mésolithiques (Ch'ng et Gaffney, 2013) . . . 59
2.31 Simulation de groupes ethniques du port de commerce de Georgetown en 1800 (Lim *et al.*, 2013) 59
2.32 Interface, modélisation et rendu dans l'éditeur 3D *ArcheoBuilder* (Suchanek, 1998) 61
2.33 Système VisTA / scène à l'intérieur d'une maison / ajout de nouveaux bâtiments / séquence de simulation / exposition au musée Ori-Amu (Kadobayashi *et al.*, 1999) 61
2.34 ArchField version iPad, représentant des élévations 3D et affichant un nuage de points (Smith et Levy, 2014) 61
2.35 Exploration d'un forum impérial par navigateur Web (Pescarin *et al.*, 2008) / modification des propriétés d'objets / fouille virtuelle (Morgan, 2009) 62
2.36 3D Heritage Online Presenter (3DHOP) : Contrôle de visibilité d'un sous-ensemble de pièces de statues, changement entre un modèle de casque actuel et sa version restituée, navigation par minimap et focus sur zone d'intérêt avec affichage de description (Potenziani *et al.*, 2015) 63
2.37 Panorama QuickTime VR du site Xunantunich (Krasniewicz, 2000) . . . 63
2.38 Numérisation des tombes Han intégrée dans un AVIE (Advanced Visualisation and Interaction Environment) (Kenderdine *et al.*, 2012) 64
2.39 Reconstitution d'un navire du XVII^{e} siècle au sein du système immersif Guppy 3D (Wells, 2008) 64
2.40 Systèmes VisTA-walk (Kadobayashi *et al.*, 1999) et TroiaVR (Jablonka *et al.*, 2002) permettant de présenter du contenu 3D et textuel interactif 64
2.41 Plan 2D, modèle 3D miniature et à l'échelle, couches d'artefacts au sein d'une restitution du temple jordanien de Petra (Acevedo *et al.*, 2001) . . 65
2.42 Nuage de points dans le système ArtifactVis2, sélection de données dans un TourCAVE et artefacts obtenus (Smith *et al.*, 2013) 65
2.43 Jeune public utilisant les systèmes ImmersaDesk et le ReaCTor (Gaitatzes *et al.*, 2000) 66
2.44 Système Macrographia de visualisation multi-utilisateur d'objets de musée (Zabulis *et al.*, 2010) et de peinture (Grammenos *et al.*, 2013) 66
2.45 Surbrillance de blocs de pierre d'une arche du château d'al-Shawbak sur PC, au sein d'un HIVE (Drap *et al.*, 2006) et sélection d'artefacts sous-marins à la plateforme technologique EVR@ (Université d'Evry Val d'Essonne) (Haydar *et al.*, 2011) 67

2.46 Processus d'annotation avec tablettes d'une reconstitution de l'exposition British Empire de 1938 (Bale *et al.*, 2011) 68
2.47 Manipulation d'objet, dessin d'annotations, éclairage à la torche virtuelle et mesure en archéologie téléimmersive (Forte et Kurillo, 2010). 68
2.48 Interface haptique pour la construction d'éléments architecturaux d'un temple grec (Christou *et al.*, 2006) 68
2.49 Toucher d'une statue via un dispositif haptique à deux points contacts (Loscos *et al.*, 2004), utilisation d'un exosquelette muni d'un dispositif haptique dans un musée virtuel (Carrozzino et Bergamasco, 2010) et rendu haptico-visuel du modèle 3D d'un bouddha (Aniyath *et al.*, 2014) 69
2.50 Danseuse sur une peinture murale, motion capture et restitution animée (Tang et Liu, 2002). 69
2.51 Système de motion capture, de projection des avatars et mise en scène au sein de décors numériques pour une prestation théâtrale (Andreadis *et al.*, 2010). 70
2.52 Reconstitution de mouvements d'habitants d'une maison du Sud de l'Angleterre à l'âge de fer (Dunn *et al.*, 2012) 70
2.53 Capture de mouvements de mains avec capteurs lors d'une séance de taille de bambou suivant plusieurs techniques (Borel *et al.*, 2016) 71
2.54 Disposition et matériels de la plateforme Immersia 72
2.55 Collaboration à distance avec la plateforme *Collaviz* 73

3.1 Illustration des questions de sécurité, d'accès aux sites et de conservation des vestiges (exemple de l'érosion du littoral (Chauviteau, 2016)) 75
3.2 Mesures des côtes britanniques à différents échantillonnages 77
3.3 Répartition géographique des sites du corpus du CNPAO 79
3.4 Typologie expérimentale des sites du corpus 79
3.5 Répartitions typologiques, chronologiques et diagramme de gantt 80
3.6 Répartitions des variables concernant les numérisations 82
3.7 Répartitions des variables concernant les modélisations 82
3.8 Typologie expérimentale des rendus fournis aux archéologues 83
3.9 Répartition des variables concernant les rendus 84
3.10 Répartition des variables organisationnelles 86

4.1 Organisation schématique des thématiques développées dans le chapitre 4 "Production d'environnements archéologiques 3D pour la recherche archéologique" 89
4.2 Vue intérieure du maillage 3D de la chambre centrale du cairn de l'île Carn 90
4.3 Interface utilisateur de l'outil Photoscan (Agisoft) utilisé dans le cadre de la reconstruction 3D de la chambre centrale du cairn de l'île Carn et du dolmen de Roh-Coh-Coët par photogrammétrie 91
4.4 Travail dans 3DS Max sur le maillage 3D issu de la numérisation du dolmen de Roh-Coh-Coët 91
4.5 Diagramme de processus 92

4.6 Positions de l'appareil pour la prise de photos dans le cadre d'une photogrammétrie de tesson de céramique 93
4.7 Morceau d'une céramique avec points homologues (en bleu) générés par photogrammétrie / nuage de points résultant 93
4.8 Maillages bruts, lissés et texturés de tessons de céramique 94
4.9 Numérisation au scanner laser de l'épave d'Erquy, nuage de points, positions des cibles et maillage 95
4.10 Flûte en os : modèle 3D issu d'une µ-tomodensitométrie en cours de nettoyage, originale à côté de ses répliques et diagramme représentant la proximité sonore de chaque réplique 96
4.11 Clavicule issue d'un squelette humain datant du Mésolithique : test de validité de contact des 2 morceaux numérisés par µ-tomodensitométrie, détection puis coupes de traces, angles d'attaque, visualisation de desquamation et impression 3D 96
4.12 Première itération de la restitution de la porte des Champs du château d'Angers au XIII^{e} siècle 97
4.13 Rendu de l'itération actuelle de la reconstitution 3D de la porte des Champs du château d'Angers au XIII^{e} siècle et support de présentation aux visiteurs du château 99
4.14 Rendus 3D montrant les sections Nord et Ouest du château de Coatfrec 100
4.15 Photos de la Citadelle d'Alep prises par un archéologue touriste, nuage de points de faible qualité et rendu final texturé du modèle 3D 100
4.16 Reconstitution 3D de la salle à manger du donjon de Sainte-Suzanne . . 101
4.17 Sections, plans et étapes de reconstitution 3D du Boullongne 102
4.18 Vue éclatée du modèle 3D et rendu final du Boullongne 106
4.19 Rendus 3D de la maison de maître, du moulin à vent, d'une maison d'un esclave et de l'arrière de la chapelle de l'habitation Loyola à Remire-Montjoly 106
4.20 Assemblage nuage/modélisation et modélisation texturée du château de Coatfrec avec dégradé de couleurs illustrant ses distances avec le nuage de points 107
4.21 Test de l'algorithme de soustraction hypothétique - existant 109
4.22 Phasage 2D/3D de construction du dolmen de Roh-Coh-Coët 109
4.23 Différents états hypothétiques aux XI^{e} et XII^{e} siècles du donjon de Ste Suzanne et aux XIII^{e}, XV^{e} et XVIII^{e} du château de Suscinio 110
4.24 Étude de coïncidence entre 2 rochers du dolmen de Roh-Coh-Coët montrant que les faces se correspondent exactement le long d'une fracture (Gouézin, 2015) 111
4.25 Parties séparées / étape de reconstruction / reconstitution du contenu d'une céramique 112
4.26 Alignement des tessons de céramique et volume du contenu déduit . . . 113
4.27 Plans de coupe de l'épave d'Erquy 113

5.1 Organisation schématique des thématiques développées dans le chapitre 4 "Méthodes d'interactions et de simulations immersives pour l'archéologie" 116
5.2 Interactions proposées pour l'archéologie : catégories, impacts, types et niveaux de Bowman (Bowman, 1999) 117
5.3 Accès difficile, intégration de la restitution 3D et exploration immersive du cairn de l'île Carn 117
5.4 Navigation libre au sein de l'épave d'Erquy, de la chapelle de Languidou et de la plantation sucrière de Rémire 118
5.5 Dispositions et exploration de la villa du Bourg Saint-Père 119
5.6 Restitution 3D intégrée dans Immersia et navigation par points d'intérêts dans le temple du Haut Bécherel 119
5.7 Exploration du Boullongne 120
5.8 Utilisation du *clipping plan* dans le cairn de l'île Carn 121
5.9 Édition d'un plan de coupe de la chapelle de Languidou 121
5.10 Utilisation d'une torche virtuelle dans le cairn de l'île Carn 122
5.11 Visualisation des étapes de construction du cairn de l'île Carn 122
5.12 Annotation symbolique dans le cairn de l'île Carn 123
5.13 Annotation par primitive 3D avec métadonnée dans la sucrerie jésuite . 124
5.14 Ouverture de porte sur le site de la sucrerie jésuite 124
5.15 Commande de direction avec la roue du Boullongne 125
5.16 Tir au canon sur le Boullongne virtuel 126
5.17 Action sur la vitesse de l'alternance jour/nuit au sein de la sucrerie jésuite 126
5.18 Vérification à l'échelle 1:1 des proportions de la restitution du temple du Haut-Bécherel 127
5.19 Premiers types de perceptions déduits des immersions au sein des environnements virtuels concernés par des interactions à l'échelle 1:1 128
5.20 Interactions proposées pour l'archéologie : sites concernés et apports scientifiques 128
5.21 Environnement virtuel dans lequel évolue le Boullongne 130
5.22 Simulation de mer agitée en condition de tempête entourant le Boullongne virtuel 130
5.23 Forces physiques appliquées au Boullongne 131
5.24 Dispositions des points de flottabilité du Boullongne 131
5.25 Simulation de l'éclairage naturel du site de la plantation sucrière de Rémire sur une période de 24 heures 132
5.26 Rendus 3D de cacaoyer, palétuvier blanc et cannelier de Ceylan 133
5.27 Simulation 3D de végétation sur la plantation sucrière de Rémire 134
5.28 Faune peuplant l'environnement virtuel du Boullongne 135
5.29 Structure XML des données sonores et sphères représentant les sources intégrées dans l'environnement de la plantation sucrière de Rémire . . . 135
5.30 Personnage d'esclave 3D éditable, corps *riggé* et squelette et dessin de pressage de manioc sur la plantation sucrière de Rémire 136
5.31 Trois personnages à bord du Boullongne et simulation du mouvement de multiples instances 136

5.32 Gravures illustrant des scènes de vie à bord et session de *motion capture* réalisée avec des historiens 137
5.33 Conférence introduisant une expérience immersive auprès d'un groupe scolaire dans le cadre des Journées Nationales de l'Archéologie 2013 . . . 138
5.34 Équipe d'historiens expérimentant le Boullongne virtuel 139
5.35 Expérience immersive grand public au sein de la villa de Bais ayant eu lieu dans le cadre des Journées Nationales de l'Archéologie 2013 139
5.36 Expériences immersives grand public avec casques et mini-cave, Journées Nationales de l'Archéologie 2014 140
5.37 Modèle 3D et impression d'un support de tessons de céramique 141
5.38 Exposition de productions 3D auprès durant les Journées Nationales de l'Archéologie 2013 et exposition/présentation des impressions 3D de la flûte en os aux Journée Science et Musique 2016 141
5.39 Tournage d'un documentaire sur le Boullongne virtuel pour l'émission Thalassa "Les perles du Morbihan" diffusée le 15/05/2015 142

INSA de RENNES
Service des Formations

AVIS DU JURY SUR LA REPRODUCTION DE LA THESE SOUTENUE

Titre de la thèse:
Techniques de production, d'exploration et d'analyse d'environnements archéologiques virtuels

Nom Prénom de l'auteur : BARREAU JEAN-BAPTISTE

Membres du jury :
- Monsieur PAZAT Jean-Louis
- Monsieur ARNALDI BRUNO
- Madame GOURANTON Valérie
- Monsieur MOREAU Guillaume
- Monsieur GUITTON Pascal
- Madame COUTURE Nadine
- Monsieur GILIGNY François
- Monsieur AUGER Réginald

Président du jury : Jean Louis PAZAT

Date de la soutenance : 10 Juillet 2017

Reproduction de la these soutenue

Thèse pouvant être reproduite en l'état
~~Thèse pouvant être reproduite après corrections suggérées~~

Fait à Rennes, le 10 Juillet 2017

Signature du président de jury

Le Directeur,

M'hamed DRISSI

INSTITUT NATIONAL des SCIENCES APPLIQUÉES · RENNES

Résumé

Si les possibilités de numérisation 3D de la présente réalité d'un site archéologique par le biais des dernières techniques d'acquisition 3D (photogrammétrie/scan laser) aident à la compréhension de son fonctionnement, elles peuvent aussi permettre de véritables hypothèses de reconstitutions de celuici tel qu'il a pu l'être à une époque donnée. Les besoins de la communauté archéologique concernant ces restitutions de structures ou d'environnements sont en effet considérables car, au-delà d'un intérêt évident en termes de valorisation du patrimoine, celles-ci permettent de véritablement mieux appréhender leurs fonctionnements et les sociétés qui les ont occupés. C'est partant de ce contexte que le premier objectif de cette thèse a été d'opérer, traiter et analyser différents niveaux de production d'environnements archéologiques 3D pour la recherche archéologique. Le second objectif a concerné la conception et la mise en place de méthodes d'interactions et de simulations immersives pour que les archéologues puissent démontrer certaines hypothèses, notamment en travaillant sur la perception d'indices visuels pertinents.

Abstract

The possibilities of 3D digitisations of an archaeological site's current reality help to understand how it works, but they can also enable hypothesis about the reconstitutions of the site as it should have been in the past. Indeed the needs of archaeologists in the reproductions of those structures or environments are significant because, beyond an obvious advantage in terms of valuation of the heritage, they make it possible to understand better their organisation and the people that lived there. It is from this context that the first objective of this thesis was to operate, process and analyze different levels of 3D archaeological environments production for archaeological research. The second objective has concerned the design and implementation of immersive interaction and simulation methods so that archaeologists could demonstrate certain hypotheses, in particular by working on the perception of relevant visual cues

INSA RENNES

N° d'ordre : 17ISAR 20 / D17 - 20

Institut National des Sciences Appliquées de Rennes
20, Avenue des Buttes de Coëmes • CS 70839 • F-35708 Rennes Cedex 7
Tel : 02 23 23 82 00 - Fax : 02 23 23 83 96