



Modèles et Outils pour la Production d'Applications de RX, Focus sur le Patrimoine Culturel (HdR)

Valérie Gouranton

► To cite this version:

Valérie Gouranton. Modèles et Outils pour la Production d'Applications de RX, Focus sur le Patrimoine Culturel (HdR). Synthèse d'image et réalité virtuelle [cs.GR]. Université Rennes 1, 2022. hal-03797971

HAL Id: hal-03797971

<https://hal.science/hal-03797971>

Submitted on 5 Oct 2022

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.

Habilitation à Diriger des Recherches
Informatique
Université de Rennes 1

**Modèles et Outils pour la Production
d’Applications de RX,
Focus sur le Patrimoine Culturel**

Valérie Gouranton
Univ Rennes, INSA Rennes, Inria, CNRS, IRISA, France

25 mars 2022

Composition du jury

- Franck Multon, Professeur, Université Rennes 2 : Président
- Ronan Boulic, Senior Scientist, EPFL, Suisse : Rapporteur
- Pascal Guitton, Professeur, Université de Bordeaux : Rapporteur
- Jean-Pierre Jessel, Professeur, Université de Toulouse : Rapporteur
- Dominique Bechmann, Professeure, Université de Strasbourg : Examinatrice
- Ronan Querrec, Professeur, ENI de Brest : Examineur

Table des matières

Introduction	1
1 Vers des abstractions	7
1.1 Modèles pour la performance des applications de RV	8
1.1.1 Modèles d'application VR large échelle	8
1.1.2 Modèles pour la détection de collision	10
1.1.3 Conclusion sur les modèles pour la performance	12
1.2 Modèles de la collaboration distante	12
1.2.1 Cohérence et espace d'interaction pour la collaboration distante	13
1.2.2 <i>Awareness</i> pour la collaboration distante asymétrique	15
1.2.3 Influence d'un public distant ou co-localisé	17
1.2.4 Conclusion sur les modèles de la collaboration distante	18
1.3 Modèles du collaborateur	19
1.3.1 Modèle unifié d'interaction collaborative	19
1.3.2 Modèle unifié d'humain virtuel et réel	20
1.3.3 L'échange d'avatars	22
1.3.4 Formation virtuelle collaborative	24
1.3.5 Conclusion sur les modèles du collaborateur	26
1.4 Modèle de l'environnement 3D	26
1.4.1 Environnement 3D réactif RV	26
1.4.2 Environnement 3D réactif RA	29
1.4.3 Extraction de données pour l'environnement 3D réactif	31
1.4.4 Conclusion sur le modèle de l'environnement 3D	35
1.5 Modèle de scénarisation	35
1.5.1 Modèle de scénario basé séquençement d'actions	36
1.5.2 Extraction de données pour le scénario	39
1.5.3 Méthodes de création du scénario	40
1.5.4 Conclusion sur le modèle de scénarisation	43
1.6 Conclusion sur les abstractions en RX	44
2 Vers des applications et outils	45
2.1 Domaine de la santé	45
2.1.1 Chirurgie	45
2.1.2 Rééducation	49
2.2 Domaine du bâtiment	53
2.2.1 Domaine de la conception	53
2.2.2 Domaine de la construction	55
2.3 Domaine des arts numériques	57
2.3.1 Cinéma VFX	57

2.3.2	Orchestre virtuel et Sonore	59
2.3.3	EvoluSon	60
2.3.4	VisInsita	61
2.3.5	The Last Supper Interactive	63
2.3.6	Creative Harmony	64
2.4	Outils de développement	66
2.4.1	Outils #FIVE et #SEVEN	66
2.4.2	Autres outils pour la productivité	70
2.5	Conclusion des applications et outils de la RX	71
3	Focus sur le Patrimoine Culturel	73
3.1	Méthodologie	73
3.1.1	Objectifs	74
3.1.2	Défis et méthode	75
3.1.3	Production 3D	77
3.2	Structuration en axes d'étude	78
3.2.1	Axe Voir	79
3.2.2	Axe Révéler	82
3.2.3	Axe Manipuler	86
3.2.4	Axe Partager	87
3.3	Structuration selon les interactions	90
3.3.1	Interactions fonctionnelles	92
3.3.2	Interactions opérationnelles	93
3.4	Présentation de cas d'études	94
3.4.1	Reconstitution d'un navire du 18ème siècle	95
3.4.2	Étude d'une urne de crémation	97
3.4.3	Étude d'une momie de chat égyptienne	100
3.4.4	Étude du site de Beg-er-Vil	102
3.5	Conclusion de la RX pour le patrimoine culturel	105
4	Conclusion	107
4.1	Conception des applications de RX	107
4.2	Domaines applicatifs	108
5	Perspectives	111
5.1	Conception des applications de RX	111
5.2	Domaines applicatifs	113
5.3	Vers la productivité des applications de RX	113
	Bibliographie	114
A	Annexe : projets de recherche	131
A.1	Projets internationaux	131
A.2	Projets nationaux	132
A.3	Projets locaux	133
A.4	Projets bi-latéraux	134
B	Annexe : encadrement	135
B.1	Doctorants	135
B.2	Post-Doc et Ingénieurs	137

Table des figures

1	Le continuum de Milgram [MK94].	1
2	Processus de fouille réelle dans un environnement virtuel	5
3	Schéma général de notre cadre d'étude	6
1.1	Schéma général des contributions liées aux modèles	7
1.2	Visualisation avec LOD (avec niveaux de détail plus ou moins détaillés) des champs altimétriques selon le point de vue : proche (à gauche) et éloigné (à droite) [GLMM04]	9
1.3	Détection de collision par lancer de rayon, 512 objets tombent un sol plan [LGA13a]	11
1.4	Détection de collision par lancer de rayon pour la simulation de tissus [LGA15b]	12
1.5	Le <i>stage</i> : différents espaces d'interaction de l'utilisateur [FCD ⁺ 10]	13
1.6	Expérimentation collaborative distante: salle immersive de IRISA-Inria RBA à Rennes (a) et salle immersive de l'UCL à Londres (b) [FDGS12]	14
1.7	Modèle de système interactif avec E/S et boucle cognitive de l'utilisateur [LC16]	15
1.8	Modèle de systèmes collaboratifs asymétriques de RM [LC16]	16
1.9	Paradigme Vishnu dans un scénario d'assemblage de carte mère. L'opérateur est à gauche et l'expert à droite [LCDG ⁺ 16]	17
1.10	Utilisateur : seul (à gauche), audience colocalisée (au milieu) ou distante (à droite). [TML ⁺ 20]	18
1.11	La Perceptive Puppet et sa relation avec le monde virtuel	21
1.12	L'architecture du <i>Shell</i> [LNGA13]	21
1.13	Les trois métaphores utilisées (a, b et c) [LBBLE ⁺ 14]	22
1.14	L'utilisateur peut déclencher l'échange de son avatar avec l'un des trois humains virtuels de l'environnement [LBBLE ⁺ 14]	23
1.15	Les 5 métaphores utilisées (selon un mouvement de caméra, linéaire ou courbe, et la présence ou non d'un effet visuel) [LBBLE ⁺ 14]	23
1.16	Architecture globale du CVET [LCG ⁺ 14]	25
1.17	Co-manipulation entre une utilisatrice et un humain virtuel, plateforme Immersia @Irisa	25
1.18	L'EV et les deux moteurs #FIVE (bleu) peuvent utiliser à la fois des composants réutilisables personnalisés (rouge) et des éléments spécifiques à l'application (vert) [BGB ⁺ 15]	27
1.19	Moteur de relation : deux concepts, un objet A (types t_1 et t_4) une relation R_a (qui relie deux patterns d'objets : l'un qui possède t_1 et t_2 et l'autre t_4)	27
1.20	Éditeur de relation intégré à Unity	28
1.21	Le modèle objet-relation étendu pour la RA (en vert les extensions apportées) [LGR ⁺ 19a]	30

1.22	L'inspecteur des types dans l'outil d'autoring et mise en place de l'appli- cation (dont tablette et objets réels) [LGR ⁺ 19a]	30
1.23	La liste des relations pré-définies (gauche) et objets virtuels (droite) [LGR ⁺ 19a]	31
1.24	L'éditeur de création de nouvelles relations [LGR ⁺ 19a]	32
1.25	Extrait de l'ontologie OntoSPM (visualisé avec l'outil Protégé) [GPJ14]	33
1.26	Structure des ontologies utilisées [LM18]	34
1.27	Processus de génération des objets/reliations #FIVE à partir du modèle objets-reliations ontologique [LM18]	34
1.28	Un exemple de scénario #SEVEN (les ronds représentent les places, les rectangles définissent les transitions)	37
1.29	Algorithme de l'agent virtuel [Léc20]	38
1.30	Un exemple de descripteur de pose de main : scalpel, main droite	38
1.31	L'interface de l'éditeur #SEVEN	39
1.32	L'exécution d'une action par l'expert métier en RV ajoute une action dans le scénario #SEVEN (exemple : prise d'un scalpel)	41
1.33	Exécution automatique du scénario par un agent virtuel	41
1.34	La visualisation graphique avec les métriques visuelles (nombre total de variations, ainsi que le nombre de nouvelles variations)	42
2.1	Table d'instrumentation réelle (à gauche) et virtuelle (à droite)	46
2.2	Environnement virtuel du bloc des erreurs [BMLD ⁺ 21]	47
2.3	Environnement virtuel du bloc sur tablette tactile [BMD ⁺ 21]	48
2.4	Exemple de comportement problématique [BMD ⁺ 21]	48
2.5	Une patiente dans le simulateur, plate forme immersive Immersia [VGD ⁺ 19]	49
2.6	Un utilisateur sous simulateur avec casque de RV [VGD ⁺ 20b]	50
2.7	Un utilisateur régulier avec les deux conditions : virtuelle et réelle [VDP ⁺ 21]	51
2.8	L'utilisatrice soit son avatar marcher dans une forêt @Inria	52
2.9	En rouge, contribution : (1) un nouveau modèle théorique de conception définissant les activités génériques de conception, (2) un scénario décrivant le nouveau modèle théorique, et (3) une implémentation du scénario dans un EV [TGB ⁺ 20]	53
2.10	Notre modèle de conception théorique générique représente : trois espaces (problème, solution et évaluation) avec sept activités associées. [TGB ⁺ 20]	54
2.11	Exemple de la sélection de l'objet de focalisation en mode collaboration forte.	55
2.12	À gauche le chantier réel et à droite l'environnement virtuel du chantier	56
2.13	Schéma de la génération du parcours de chasse aux risques	56
2.14	Les environnements d'entraînement pour les deux modalités (RV, image de gauche et image du milieu). L'image de droite montre le plateau de tournage réel [BGA16]	58
2.15	Le scénario utilisé pour notre expérience comprend un tigre virtuel avec lequel l'acteur doit interagir : les 6 images montrent les positions clés du tigre pendant la scène. [BGA16]	58
2.16	L'orchestre virtuel pour des machines d'usine, plateforme Immersia [SNGG14]	60
2.17	Époque romantique : scène inspirée du tableau de Friedrich, <i>Cimetière d'un cloître sous la neige</i>	61
2.18	Époque romantique : La salle de bal, inspirée de la comédie musicale d'ani- mation romantique de Walt Disney <i>La Belle et la Bête</i> et du film de Terry Gilliam <i>Les aventures du Baron de Munchausen</i>	61

2.19	Le pendule lumineux équipé de sa cible infrarouge passive [BGN ⁺ 19]	62
2.20	Aperçu de la performance VisInsita (2018) [BGN ⁺ 19]	62
2.21	Visualisation du nuage de points de l'extérieur de la Basilique	63
2.22	LSI: Outil virtuel du théorème d'Alberti	64
2.23	Creative Harmony : danseuse dans le tableau de co-crédation de paysage dans Immersia (à gauche) et musicien en live dans Immersia (à droite)	64
2.24	Creative Harmony : vue de l'utilisateur en co-crédation	65
2.25	#FIVE et #SEVEN sont accessibles sous Unity (menus)	66
2.26	Interface de l'éditeur de types #FIVE	67
2.27	Interface de l'éditeur de relation #FIVE	67
2.28	Interface de l'éditeur de scénario #SEVEN	68
2.29	Suivi temps réel de l'exécution du scénario #SEVEN	69
2.30	Mise en évidence d'objets avec une aide visuelle (à gauche) et interface de mise en évidence d'un objet (à droite)	70
2.31	Exemple de préhension d'un objet scalpel	70
2.32	Montage en croix : 3 scénarios sont suffisants pour créer les 8 scénarios	71
3.1	Les défis réciproques de la RX et du patrimoine culturel	75
3.2	Méthodologie générale	77
3.3	Assemblage nuage/modélisation et modélisation texturée du château de Coatfrec (à gauche) avec dégradé de couleurs illustrant les distances avec le nuage de points (à droite, le bleu représente la distance la plus petite) [BBP ⁺ 14]	79
3.4	Modèle 3D du site (en haut, à gauche), simulation sonore de l'environnement naturel du site (en haut, à droite), simulation du parcours de nuit et de jour (au centre) et interaction fonctionnelle en réalité virtuelle (en bas) [BPB ⁺ 15]	80
3.5	Étude de cas de la tombe aristocratique gauloise de Warcq	83
3.6	Micro-fouille d'un bloc en laboratoire	84
3.7	Poids réel et balance (en haut, à gauche), numérisation et modélisation (en haut, au centre et à droite), interaction fonctionnelle dans un contexte historique, en réalité virtuelle (en bas) [NGT ⁺ 15]	86
3.8	Impression 3D démontable du poids	87
3.9	Visualisation immersive du nuage de points à 1:1 (en haut, à gauche), exemple de vue de coupe 2D obtenue avec l'outil (en haut, à droite), interactions avec le nuage de points en haute définition (en bas, à gauche), manipulation du plan de coupe avec une tablette tactile <i>trackée</i> (en bas, au centre), position d'une vue photographique dans l'application de Réalité virtuelle (en bas, à droite).	89
3.10	Outil de segmentation : a) Urne de crémation ; b) Rendu volumique ; c) Nuage de points des objets métalliques en RV ; d) Nuage de points du bracelet segmenté (jaune)	90
3.11	Interactions fonctionnelles, Sirène de Cagnard-LaTour à gauche et en RV à droite.	92
3.12	Simulation physique de la Boullongne (en haut) et interactions fonctionnelles avec la barre à roue et la cloche (en bas) [BNG ⁺ 15]	93
3.13	Interactions opérationnelles avec les gravures en Réalité Augmentée [RRL ⁺ 14] (à gauche) et en Réalité Virtuelle (à droite) [GBCG12, CBP ⁺ 17]	94
3.14	Micro-fouille réelle (en haut, à gauche), système de Réalité Mixte pour visualiser l'intérieur de l'urne (en haut, à droite), système de Réalité Virtuelle pour effectuer une fouille virtuelle (en bas)	95

3.15 Étude de cas du navire du XVIIIe siècle, le Boullongne	96
3.16 Étude de cas de l'urne de crémation de Guipry	98
3.17 L'impression 3D transparente de l'urne de Guipry @Irisa	99
3.18 Outils : plan de coupe (en haut à gauche), loupe (en haut à droite), lumière directionnelle (avec trois directions différentes, en bas)	99
3.19 Annotation d'un objet	100
3.20 Momie de chat et son impression 3D transparente, exposées au Musée des Beaux-Arts de Rennes @MBAR	101
3.21 Étude de cas d'une momie de chat	102
3.22 Le site de Beg-er-Vil pendant la fouille de 2014 (à gauche) et un schéma des différentes campagnes de fouilles (à droite)	103
3.23 En haut à gauche, les zones de navigation définies pour le site. A droite, les données CSV avec affichage d'un mètre carré (en haut) et les données de pH (en bas). En bas, l'interface permettant de choisir les couches de données à afficher.	104
3.24 La fouille virtuelle	105

Liste des tableaux

3.1	Études de cas de l'axe Voir	81
3.2	Études de cas de l'axe Révéler	85
3.3	Études de cas de l'axe Manipuler	88
3.4	Études de cas de l'axe Partager	91

Introduction

L'*eXtended ou Cross Reality* (nommée dans la suite du document RX) est généralement présentée comme un concept global qui intègre un domaine de recherche, des plates-formes technologiques, du contenu numérique 3D, ainsi que l'expérience utilisateur pour visualiser et interagir avec des objets numériques et/ou physiques dans un environnement réel et/ou numérique. La RX peut également être considérée comme un terme générique qui inclut la réalité virtuelle (RV), la réalité augmentée (RA) et la réalité mixte (RM), cette dernière étant généralement considérée comme une généralisation de la RV et de la RA. La Figure 1 présente le continuum des différents environnements associés [MK94]. Dans ce continuum, on part d'un environnement réel pur d'une extrémité jusqu'à un environnement virtuels (EV) pur à l'autre extrémité, en passant par un environnement de réalité augmentée et de virtualité augmentée.

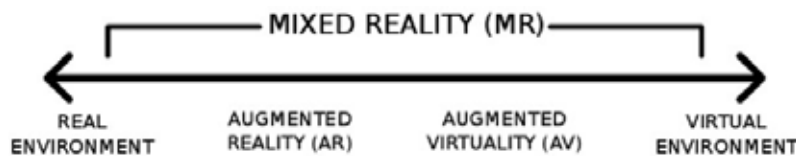


FIG. 1 – *Le continuum de Milgram* [MK94].

Nous commençons par définir les concepts et présenter les définitions importantes. La réalité virtuelle est souvent considérée uniquement comme un domaine de l'informatique en relation avec les mondes numériques 3D interactifs. Elle occupe en fait une place particulière dans le schéma scientifique habituel en associant les sciences humaines et l'ingénierie. Sa définition est pourtant clairement définie depuis 2006 : la réalité virtuelle est un domaine de recherche dont le but est de permettre une activité sensorimotrice et cognitive pour une personne (ou des personnes) dans un monde artificiel créé numériquement, qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel [FMA06]. Cette affirmation place l'utilisateur et son activité au centre de la RV. L'utilisateur est immergé par son esprit, ses sens et son corps.

L'immersion est l'état (perceptif, mental, émotionnel) d'un sujet lorsqu'un ou plusieurs sens sont isolés du monde extérieur et sont alimentés uniquement par les informations issues de l'ordinateur [PTJ94]. Pour les applications de réalité mixte, l'immersion peut être un facteur important, car elle permet à l'utilisateur de se concentrer davantage sur le contenu artificiel affiché et sur la tâche à réaliser.

La Réalité Augmentée (RA) quant à elle est un domaine qui combine le réel et le virtuel, en temps réel et donne l'impression que les objets virtuels et réels coexistent dans le même monde tridimensionnel [ABB⁺01]. La RA augmente la réalité avec des données numériques et permet à l'utilisateur d'interagir avec les deux environnements (réel et numérique).

Que ce soit pour la réalité virtuelle ou la réalité augmentée, l'environnement doit être réactif, afin de pouvoir évoluer en fonction des actions de l'utilisateur. Les applications doivent être conçues pour être en temps interactif (ou par abus de langage temps réel), c'est-à-dire que les actions de l'utilisateur doivent être prises en compte et transformées en actions sur le contenu numérique sans que l'utilisateur puisse remarquer du retard (latence).

L'interaction est une modalité essentielle en RX. Les principales classes d'interaction définies selon Bowman [BJH99] sont la navigation, l'interaction avec l'environnement virtuel et l'interaction avec l'application.

- Navigation : cette interaction en lien avec le point de vue de l'utilisateur est fondamentale car elle est la principale et, malheureusement, parfois la seule interaction avec l'univers virtuel. Dans ce cas, l'utilisateur interagit avec la caméra liée à son point de vue.
- Interaction avec l'environnement virtuel : cette famille d'interactions est liée à la modification des caractéristiques de certains objets qui appartiennent à la simulation de l'environnement virtuel (sélection ou manipulation).
- Interaction avec l'application : cette famille d'interactions est liée à la modification des propriétés de l'application RX à travers des objets de dialogue qui ne sont pas liés à la simulation.

Une interaction est définie par plusieurs caractéristiques. La première concerne la ou les modalités, c'est-à-dire les moyens dont disposent les utilisateurs pour réaliser l'interaction (main, corps, regard, cerveau ...). Une deuxième caractéristique est la métaphore, c'est-à-dire une représentation de l'interaction dans le monde virtuel pour la rendre compréhensible à l'utilisateur (main virtuelle, pointeur, rayon, outil virtuel ...). La dernière caractéristique est le dispositif utilisé, c'est-à-dire un dispositif technique utilisé dans l'interaction comme par exemple une manette. Ces différentes caractéristiques sont largement documentées dans la littérature afin d'identifier les plus adaptées et les plus pertinentes en fonction d'un domaine et d'une tâche spécifique.

Il existe différentes technologies de la RV et la RA. Chaque type de système RX a ses propres caractéristiques et certains peuvent s'avérer plus adaptés à certains cas d'utilisation.

Les différents systèmes de Réalité Virtuelle :

- Les salles immersives (de type CAVE [CNSD⁺92]) sont des installations de RV haut de gamme comprenant de multiples murs sur lesquels des contenus 3D stéréoscopiques peuvent être projetés en temps réel. Les utilisateurs peuvent interagir à l'échelle 1 avec des objets virtuels. Ces systèmes sont très confortables pour l'utilisateur car il est présent avec son propre corps dans la simulation et peut se déplacer naturellement dans l'espace physique [GGD⁺14]. Ces systèmes sont généralement mono-utilisateur, même si certaines installations proposent une mise en œuvre multi-utilisateurs. Mais pour ce dernier cas, le système engendre des problèmes d'occlusion entre les utilisateurs entre eux et la scène virtuelle. Le principal inconvénient de ce type de système est son coût. Il existe cependant des versions à bas coût mais avec une qualité de rendu et de *tracking* assez faibles.

-
- Les *Workbenches*, ou bureaux immersifs sont des termes généralement utilisés pour désigner une combinaison d'un ou plusieurs écrans utilisés pour afficher du contenu en 3D stéréoscopique. Contrairement aux salles immersives, à cause de leur petite taille, les workbenches ne permettent pas toujours une interaction à l'échelle 1 avec des objets virtuels. Toutefois, leur taille et leur coût limités en font un système intéressant pour fournir des interactions dans un environnement stéréoscopique. En particulier, ils peuvent représenter un outil efficace pour travailler sur des objets de taille limitée [LGG⁺18].
 - Les *Head-Mounted Displays (HMD)* ou visiocasques sont des casques de RV qui peuvent être utilisés pour afficher du contenu en 3D stéréoscopique. Les utilisateurs sont isolés du monde réel et sont donc, dans un sens, plus immergés que dans une salle immersive ou avec un workbench. Le principal inconvénient de ce type de système est que l'utilisateur perd la relation avec son propre corps qui doit alors être représenté par un avatar (il existe de nombreux travaux sur le sujet des avatars). Cet inconvénient peut s'avérer un avantage si l'on souhaite choisir l'avatar de l'utilisateur. De plus, le système peut manipuler partiellement le mouvement affiché de l'avatar par le biais d'une certaine distorsion afin de rendre l'expérience globale plus agréable et plus efficace. Mais une distorsion excessive peut devenir perceptible et rompre le sentiment d'être incarné dans l'avatar. Il faut alors identifier l'ampleur de la distorsion maximale qui n'est pas perceptible par un individu [PHB⁺21]. Les casques sont devenus très populaires grâce à leur faible prix. Ils peuvent largement être utilisés par exemple pour la formation ou dans les musées pour offrir des expériences immersives aux visiteurs.

Les différents systèmes de Réalité Augmentée :

- Les systèmes de type VST (Video see-through) [MK94] sont soit des systèmes portatifs basés sur des tablettes ou des smart-phones, soit des casques avec des caméras comme les casques Windows à réalité mixte. Dans ce cas, la scène réelle est filmée par les caméras de l'appareil et le contenu numérique est ensuite inséré pour être affiché sur l'écran (ou les écrans) de l'appareil VST. Ce type de système de RA est très populaire dans les musées, où il suffit d'un smart-phone ou d'une simple tablette. Les interactions et la complexité des simulations proposées avec le VST sont limitées par les performances de calcul de l'appareil, et l'affichage n'est pas stéréoscopique. Des HMD offrent un rendu stéréoscopique, mais la qualité de la vue du monde réel dépend des performances des caméras de l'appareil.
- Les systèmes de type OST (Optical see-through) [MK94] sont des systèmes où l'utilisateur voit la réalité directement à travers des écrans semi-transparents devant ses yeux, qui insèrent du contenu numérique, comme par exemple l'HoloLens de Microsoft, et le Magic Leap. Les versions actuelles de ces appareils sont encore perfectibles en termes de champ de vision et de suivi, mais les applications sont prometteuses, notamment pour le patrimoine culturel [GPOG19].
- La réalité augmentée spatiale SAR [BR05] est un terme utilisé dans la communauté de la RA pour caractériser la RA projective où le contenu numérique 3D est directement projeté sur des objets réels. Ce type de système est largement utilisé par exemple dans les spectacles culturels sur les monuments, mais peut également être utilisé pour projeter des textures de surface sur des objets du patrimoine culturel tels que des gravures ou des statues avec des processus de calibrage et de déformation particuliers [KLS⁺18, RRL⁺14]. Ce type de système peut également être utilisé pour afficher le contenu interne d'un objet, mais dans ce cas, le système doit traiter la

perception de la profondeur et intégrer un suivi de la tête pour afficher le point de vue correct de l'utilisateur [GPN⁺18].

Quel que soit le système et la modalité utilisés, en observant la manière dont les applications de RX sont créées, nous constatons qu'elles sont actuellement conçues grâce à l'utilisation de langages informatiques généraux qui ne sont pas dédiés aux spécificités du domaine de la RX (comme l'environnement ou l'interaction) et qui plus est, sont réservés uniquement à des personnes avec des compétences en programmation informatique et donc non ouverts à des experts métier d'un certain domaine applicatif. Par exemple, pour le moteur de jeu Unity, actuellement largement utilisé dans les communautés scientifiques et industrielles, l'utilisation de scripts C# est courante, nécessitant des compétences en informatique et de plus ne permet pas toujours une ré-utilisation efficace et modulaire du code.

Les modèles existants dédiés de la RX comme ceux des environnements de réalité virtuelle et les modèles d'interactions 3D sont peu génériques. Ils ne permettent pas de s'adapter à plusieurs situations et plusieurs domaines d'application. Ils relèvent souvent de développement ad hoc réalisés dans un cas précis et un domaine applicatif particulier. Toute évolution de l'application est alors rendue très difficile et coûteuse. De plus, l'enchaînement des actions ou la scénarisation d'une application ne sont souvent pas clairement définis. Ils sont cachés voire noyés dans le code des applications. Ce qui nécessite un effort important lors d'une modification.

Les interactions 3D dans l'environnement sont encore souvent mono-utilisateur alors que la collaboration constitue un mode de fonctionnement important dans les pratiques réelles dans la plupart des domaines applicatifs comme par exemple en industrie ou en santé.

Enfin, l'interaction doit tendre vers le temps réel pour que la latence soit acceptable. La performance des applications RX doit être prise en compte de manière systématique pour les environnements large échelle.

La conséquence de ces différentes observations est un manque certain de productivité dans la RX, un cloisonnement des domaines d'applications et une restriction concernant les utilisateurs finaux de la technologie aux informaticiens. La solution que nous préconisons est l'utilisation d'abstraction via des méthodes et outils de haut niveau pour gagner en productivité dans la phase de développement des applications de RX.

De ce constat, nous avons extrait les principales revendications que nous détaillons dans ce mémoire :

- La performance pour les applications de RX doit être suffisamment importante pour que la latence soit acceptable lors de l'exécution des applications large échelle. Les architectures matérielles de type grappes de PC ou GPU peuvent être une réponse.
- La collaboration est utilisée de manière importante dans la vie courante et devrait donc apparaître aussi fortement dans les applications de RX.
- L'environnement 3D purement géométrique tel qu'il est utilisé actuellement n'est pas suffisant pour produire des applications dites intelligentes. Un ajout de sémantique, de fonctions et de propriétés sur cet environnement 3D le rend informé. Ce sont ces éléments additionnels qui vont permettre d'augmenter la capacité d'interaction avec cet environnement et au final gagner en productivité.
- Toute application de RX peut être représentée à l'aide d'un scénario car elle contient des interactions (plus ou moins sophistiquées) à effectuer. Du point de vue des développeurs, ces interactions sont vues comme du simple code. Ces développements

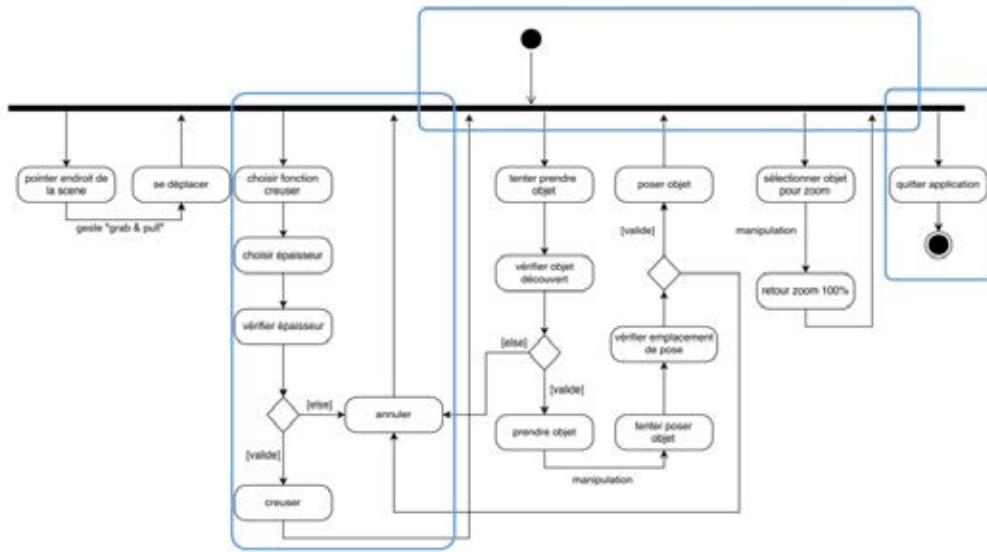


FIG. 2 – *Processus de fouille réelle dans un environnement virtuel*

induisent une distance par rapport à la notion de scénario ce qui fait qu'ils n'ont pas toujours conscience de cette notion.

- Chaque processus métier dans un domaine d'application est souvent défini par un scénario. Par exemple, la Fig. 2 présente un processus de fouille archéologique réelle avec une représentation UML. L'expert connaît parfaitement son processus métier mais a cependant parfois du mal à l'exprimer clairement auprès du développeur et vice et versa.
- Les langages de programmation classiques (comme C# ou C++ par exemple) sont très généraux et ne sont donc pas adaptés aux contraintes de la RX. De plus leurs utilisations sont impossibles par des non experts en informatique. Un *Domain Specific Language* (DSL) dédié, par exemple, scénario mais aussi environnement et interaction sera plus efficace qu'un langage de programmation classique.
- Enfin, si la RX est très utilisée pour des applications professionnelles dans les domaines de l'industrie, de la santé ou encore du bâtiment, elle est encore peu utilisée dans le domaine du Patrimoine Culturel où elle se borne souvent à de la simple navigation dans un contexte muséal grand public alors que la RX pourrait s'immiscer fortement dans les métiers du patrimoine culturel comme par exemple pour les archéologues ou les historiens.

Notre objectif est de concevoir une usine à fabriquer des applications collaboratives de RX performantes, qui ne soit pas dédiée à un domaine applicatif particulier et qui soit à la portée de non-informaticiens.

Notre méthodologie est présentée dans le schéma de la Fig. 3, version mono utilisateur (par simplicité de lisibilité). L'utilisatrice est dans une boucle perception, décision, action. Elle interagit par une activité sur l'environnement 3D via une technique d'interaction et a un retour perceptif de son action. Son activité est connectée à un scénario. L'environnement 3D et le scénario sont représentés par des modèles, et peuvent être alimentés par des informations de haut niveau dépendantes du domaine. Ces informations peuvent être construites, généralisées ou encore synthétisées lors de la création de l'application de manière semi-automatique par observation d'activités réelles ou par actions

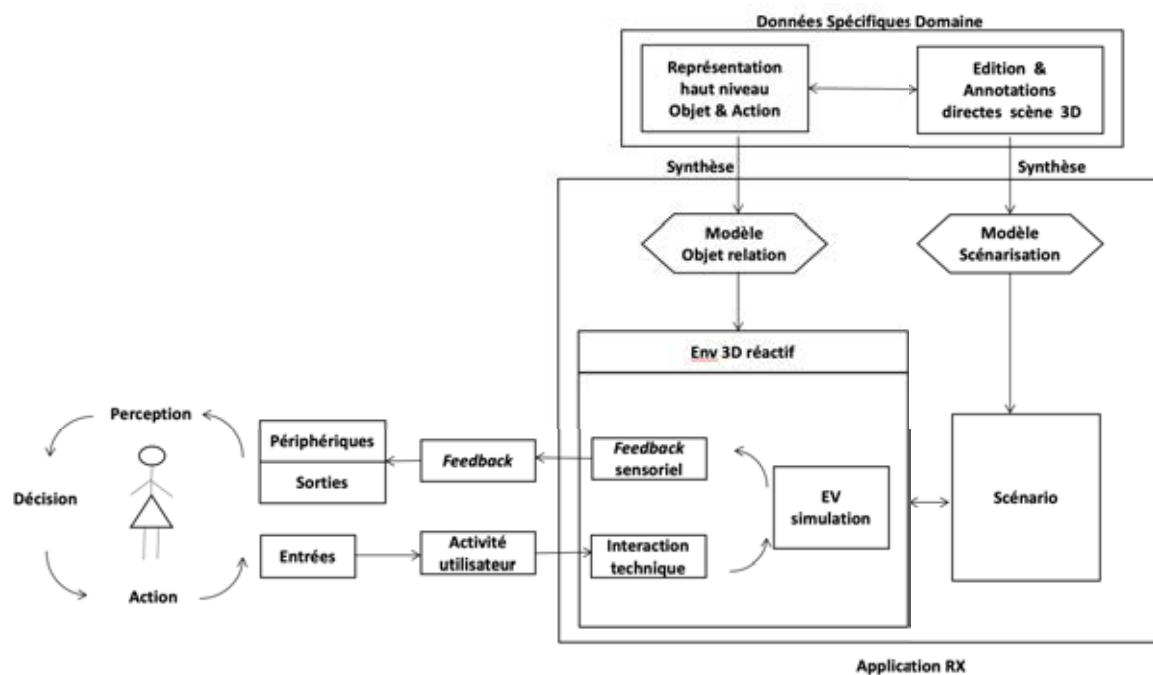


FIG. 3 – Schéma général de notre cadre d'étude

directement dans l'environnement 3D.

Cette méthodologie induit de définir des abstractions avec des propositions de modèles, langages et solutions logicielles (chapitre 1). De plus, notre démarche est suffisamment générique pour s'appliquer à différents domaines applicatifs. Nous présentons des applications dans différents domaines applicatifs (chapitre 2) comme la santé, le bâtiment ou les arts numériques. Nous nous attardons plus longuement sur le Patrimoine Culturel (archéologique et historique) que nous avons particulièrement étudié (chapitre 3). Nous concluons notre démarche et travaux (chapitre 4) et proposons des perspectives de recherches (chapitre 5). Enfin, nous listons en annexe, les projets de recherche (Annexe A) et les encadrements de doctorants, post-doc/ingénieurs (Annexe B).

Chapitre 1

Vers des abstractions

Notre objectif est de proposer une méthodologie générale qui permet de concevoir des familles d'applications de RX performantes possiblement collaboratives. Cette méthodologie n'est pas liée à un domaine applicatif particulier et doit donc être générique. L'intérêt de cette genericité est de pouvoir ré-utiliser les composants mais également de les instancier sur un domaine applicatif dédié pour gagner en productivité pour les familles d'applications de ce domaine. De plus, nous nous sommes fixés comme contrainte de garder l'utilisateur expert métier dans cette conception puisqu'il détient les connaissances du domaine étudié. Nos propositions doivent donc être à la portée de non informaticiens. Enfin, pour gagner en efficacité, nous devons tendre vers l'automatisation des procédés. Pour toutes ces raisons, nous devons dans un premier temps abstraire les composants d'une application de RX et proposer des modèles pour chacun d'entre eux. Pour chaque modèle défini, nous devons étudier la manière de l'alimenter automatiquement à partir des données ou connaissances à disposition.

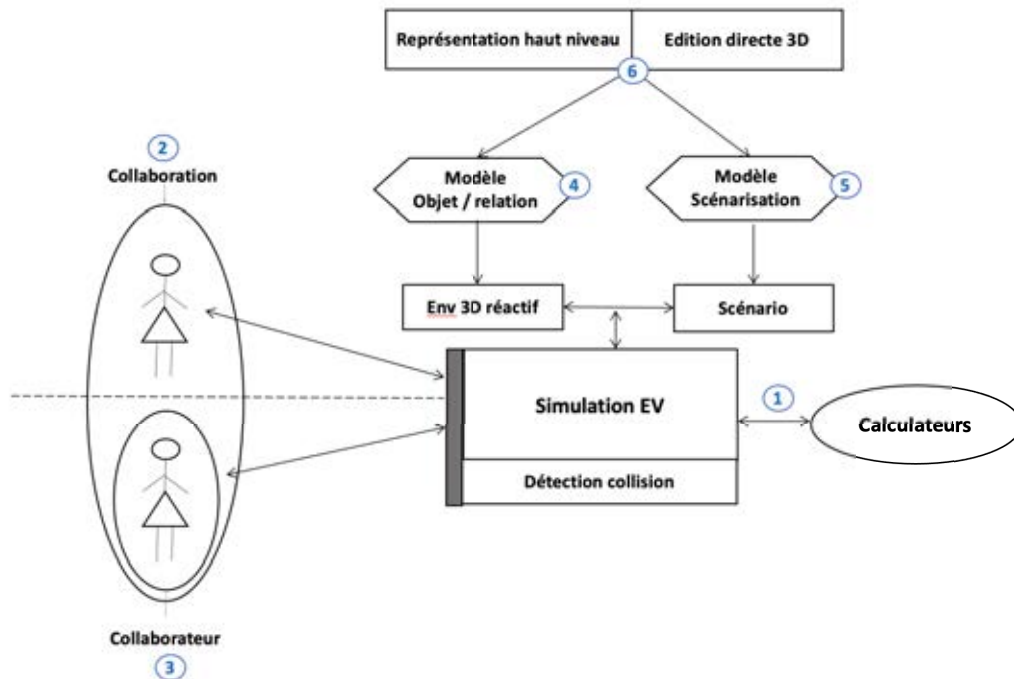


FIG. 1.1 – Schéma général des contributions liées aux modèles

Une application de RX est constituée d'un environnement 3D dans lequel un ou des utilisateurs interagissent entre eux et avec des objets, le tout alimenté par des calculateurs. Un schéma des contributions est présenté dans la Fig. 1.1. Tout d'abord, une application de RX doit être performante, nous avons donc proposé des solutions qui permettent de gagner en efficacité (contribution 1, Section 1.1). Ensuite, nous nous sommes concentrés sur les applications multi-utilisateurs distantes et plus précisément sur la manière de rendre la collaboration plus efficace. Pour ce faire, nous présentons des modèles de collaboration (contribution 2, Section 1.2). Chaque utilisateur voire collaborateur doit également être abstrait en un modèle de collaborateur (contribution 3, Section 1.3). Les utilisateurs sont présents dans un environnement 3D, nous présentons donc un modèle représentant l'environnement 3D enrichi d'informations sémantiques (contribution 4, Section 1.4). Les activités de chaque utilisateur donnent lieu à un modèle de scénarisation qui est présenté en Section 1.5 (contribution 5). Enfin, les modèles d'environnement 3D et de scénarisation peuvent être alimentés par des informations de haut niveau d'une part et par des éditions directes dans l'environnement lui-même (contribution 6, Sections 1.4 et 1.5).

1.1 Modèles pour la performance des applications de RV

Nous nous sommes intéressés aux problématiques d'architecture pour la performance des applications de RV. Au début des années 2000, l'apparition des grappes de PC a enfin permis la démocratisation et le déploiement des systèmes de RV dans la plupart des laboratoires et des entreprises. Nous avons contribué à proposer des solutions logicielles pour ces nouveaux calculateurs (Section 1.1.1). Par la suite, nous avons étudié dans le cadre d'environnements complexes, la première étape des algorithmes de simulation physiques, la détection de collision, qui correspond à un goulot d'étranglement calculatoire. Nous avons proposé des méthodes et algorithmes performants multi-coeurs ou multi-GPU 1.1.2.

1.1.1 Modèles d'application VR large échelle

Au siècle dernier, les applications de RV ne tournaient pas sur un simple PC mais sur des machines dédiées très onéreuses comme par exemple les Silicon Graphics Onyx. Au début des années 2000, des composants de base haute performance sont disponibles pour construire des grappes de PC suffisamment puissantes pour exécuter des applications de réalité virtuelle. Cependant des solutions logicielles sont nécessaires pour fournir un niveau d'abstraction sur ces machines afin de faciliter le développement, la portabilité, la configuration des grappes et le contrôle de l'exécution. Des plateformes comme VR Juggler [ABCN01] ou Maverik [HCK⁺01] ont été conçues dans ce but mais ne supportaient pas encore les grappes de PC.

Nous avons donc proposé des solutions logicielles dédiées aux grappes de PC. Nous avons proposé, 2002, Net Juggler [AGL⁺02] qui a été la première bibliothèque open source qui permettait aux composants de base de la plateforme VR Juggler de s'exécuter sur une grappe de PC. La parallélisation des applications était transparente pour l'utilisateur et conduisait à des exécutions de haute performance même avec des réseaux à bande passante limitée.

Le support du *swaplock* (synchronisation des échanges de buffer) logiciel est intégré dans Net Juggler mais pas le *genlock* (synchronisation des signaux vidéo). Nous avons alors proposé le logiciel open source SoftGenLock [AGL⁺03] qui fournit un genlock logiciel, sans nécessiter de matériel spécifique ni même de code source de pilote de carte graphique.

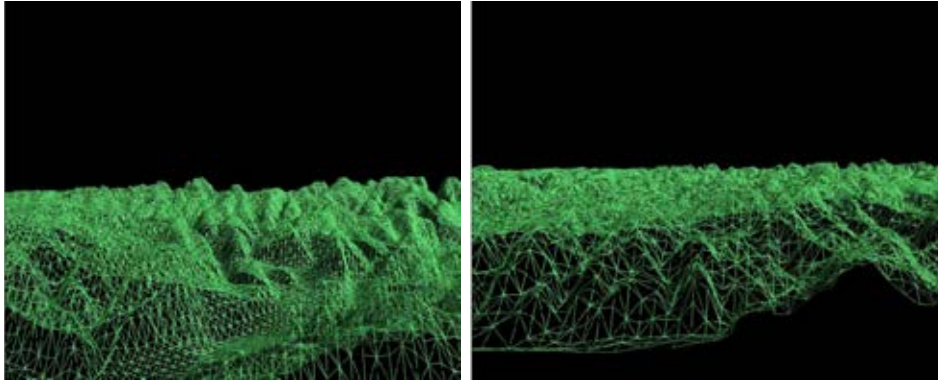


FIG. 1.2 – Visualisation avec LOD (avec niveaux de détail plus ou moins détaillés) des champs altimétriques selon le point de vue : proche (à gauche) et éloigné (à droite) [GLMM04]

L'association de ces deux bibliothèques permet d'exécuter une application VR Juggler avec une stéréo active et des affichages multiples sur une grappe de PC. Les tests effectués ont montrés que ces logiciels n'introduisent pas de surcharge significative.

En terme d'application, nous avons présenté une méthode permettant de rendre de manière interactive de grands ensembles de données en 3D sur un cluster de PC. Nous avons pris des modèles géologiques qui sont décrits par des champs altimétriques, c'est-à-dire des grilles rectangulaires de données altimétriques $H(x,y)$ avec des points régulièrement espacés sur les axes x et y . Nous avons présenté un cadre de parallélisation pour les algorithmes de niveaux de détails (LOD) afin de naviguer dans des champs altimétriques (*height fields*) (Fig. 1.2) [GLMM04]. Nous avons tiré parti de l'extensibilité des architectures en grappe de RV en distribuant les données sur les nœuds de la grappe et en évitant les communications et la collecte de données inutiles. Nous avons ensuite étendu ce travail avec une méthode de partitionnement des données basée sur des tuiles qui permet à la fois de réduire le déséquilibre de la charges et de résoudre le problème des frontières. [GMMN05].

Le schéma de parallélisation de Netjuggler est basé sur l'exécution d'une copie de l'application sur chaque nœud. Les données sont dupliquées et certains calculs sont donc redondants. Pour certaines applications, cela peut constituer un goulot d'étranglement en matière de mémoire et de performances. Pour pallier à ce problème, nous avons conçu FlowVR [AGL⁺04]. Cet intergiciel était dédié aux applications de réalité virtuelle distribuées sur des grappes ou des grilles de calcul. FlowVR supporte le couplage de codes parallèles hétérogènes et est orienté vers la réutilisation des codes. FlowVR permet une large gamme de politiques inter-médias pour mieux équilibrer les performances des applications entre les niveaux de détails, les latences et les taux de rafraîchissement.

FlowVR distingue deux parties principales dans une application, les modules et le réseau. Les modules sont des boucles sans fin qui lisent et écrivent des données sur les ports d'entrée et de sortie. Les modules sont assemblés dans un réseau avec des fonctionnalités avancées pour le traitement des messages. Il permet le couplage de codes parallèles et la conception de schémas de communication et de synchronisation complexes.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet RNTL GEOBENCH A.2 et d'une bourse région avec le BRGM d'Orléans.

1.1.2 Modèles pour la détection de collision

Pour des environnements très complexes, l'interaction temps-réel est impossible à atteindre. En effet la géométrie détaillée et les propriétés physiques spécifiques engendrent des environnements large échelle avec un goulet d'étranglement calculatoire pour les algorithmes de simulation physique. Nous nous sommes intéressés à la détection de collision, tâche essentielle et la première étape du pipeline général de ces algorithmes.

Tout d'abord, nous avons proposé un modèle de détection de collision unifié et adaptatif sur architectures Multi-cœur et Multi-GPU. Ensuite, nous avons étudié plus précisément la phase de la détection de collision la plus gourmande en terme de calculs, la *narrow phase*.

Modèle Unifié et Adaptatif sur Architectures Multi-cœur et Multi-GPU

Nous avons en premier lieu étudié le goulet d'étranglement calculatoire de la détection de collision en regard de l'évolution des architectures machines pour des objets non-déformables. Nous en avons déduit des critères : généricité, structuration, adaptativité et rapidité. [AGA10]

Nous nous sommes d'abord concentrés sur la conception d'algorithmes parallèles génériques (sur multi-cœur et multi-GPU) pour la détection de collision. La détection de collision est définie par plusieurs étapes : la *Broad Phase* (i.e. la détection de quel objet est en collision avec quel objet), puis la *Narrow Phase* (calcul plus précis de la collision). Nous avons conçu des algorithmes parallèles pour ces deux phases.

Nous avons proposé un premier algorithme parallèle de Broad Phase basé sur la méthode classique de *Sweep and Prune* pour des architecture multi-cœurs et GPU [AGA11]. Les résultats ont montré que cette nouvelle version parallèle de l'algorithme, basée sur une approche semi-brute, permettait de réduire le temps de calcul (par exemple une réduction d'un facteur 5 sur 8 cœurs).

Le second algorithme proposé concerne la Narrow Phase. Le modèle de répartiteur parallèle utilisé est basé sur un nouveau concept générique de matrice algorithmique dynamique et généralisable aux autres étapes du pipeline. Il est alors possible d'évaluer les algorithmes avant une simulation selon des classes d'objets définies au préalable [AGA12].

Nous avons proposé une nouvelle structuration du pipeline de détection de collision pour permettre de prendre en compte l'architecture d'exécution. Un nouveau modèle de pipeline parallèle a également été proposé, il permet d'exécuter les différentes étapes du processus en parallèle [AGA10]. Nous avons pu rompre la séquentialité des phases tout en conservant celle du traitement d'une paire d'objets pour raffiner la précision des calculs. L'analyse des évaluations ont montré que ce nouveau pipeline est plus performant que le modèle séquentiel. Ce pipeline est générique au sens où il est basé sur des algorithmes pouvant s'exécuter sur un nombre quelconque de cœurs. Il est également conçu avec une approche d'adaptation dynamique de la répartition des threads pour équilibrer la charge en fonction des simulations.

Nous avons proposé une adaptation dynamique des algorithmes de l'étape de Broad phase basée sur des précalculs hors-lignes [AGA14]. Les précalculs permettent de définir les domaines de performance optimale des algorithmes disponibles. Ils offrent ainsi la possibilité de pouvoir, durant la simulation, changer dynamiquement l'algorithme utilisé par

un autre plus rapide.

Enfin, nous avons proposé un modèle distribué et anticipatif pour la détection de collisions et la gestion distribuée des collisions. La méthode a consisté à relâcher les contraintes de synchronisation dans le pipeline de détection et de réponse aux collisions pour permettre à la simulation de s'exécuter de manière décentralisée et distribuée. [DLA13].

Modèles et algorithmes de Narrow phase par lancer de rayon

Nous nous sommes aussi concentrés sur la narrow-phase dans laquelle les tests de collisions sont effectués sur des versions détaillées des modèles géométriques. L'objectif est d'améliorer les performances de la détection de collision lors de l'utilisation d'objets géométriques complexes (formes représentées par un maillage, éventuellement concave et/ou déformable). Nos méthodes permettent d'accélérer le calcul de la narrow-phase. Les algorithmes proposés peuvent être implémentés sur GPU pour profiter de leur puissance de calcul et ainsi encore améliorer les performances.

Pour réaliser la narrow-phase, nous avons proposé un pipeline adapté à une implémentation GPU. Ce pipeline permet de réaliser la narrow-phase à l'aide d'algorithmes basés lancer de rayon [LGA15a]. Notre méthode repose sur un principe commun où tous les tests de collision sont effectués par lancer de rayon à partir des sommets des objets. Cette généralité nous permet de réaliser les tests sur des maillages ayant n'importe quelles propriétés (rigide ou déformable, convexe ou concave). Les algorithmes de lancer de rayon utilisés étant dynamiquement choisis en fonction des propriétés des objets pour optimiser les performances.

Nous avons généralisé la méthode de détection de collision utilisée dans le pipeline pour supporter, en plus des objets volumiques (représentés par leurs surfaces, Fig. 1.3) [LGA13a], des objets surfaciques (tels que des tissus, Fig. 1.4) [LGA15b] (vidéo¹) avec interaction haptique [LGLM⁺17]. Cette méthode est compatible avec le pipeline proposé et permet de réaliser des tests de collisions entre n'importe quelle combinaison d'objets volumiques et surfaciques.

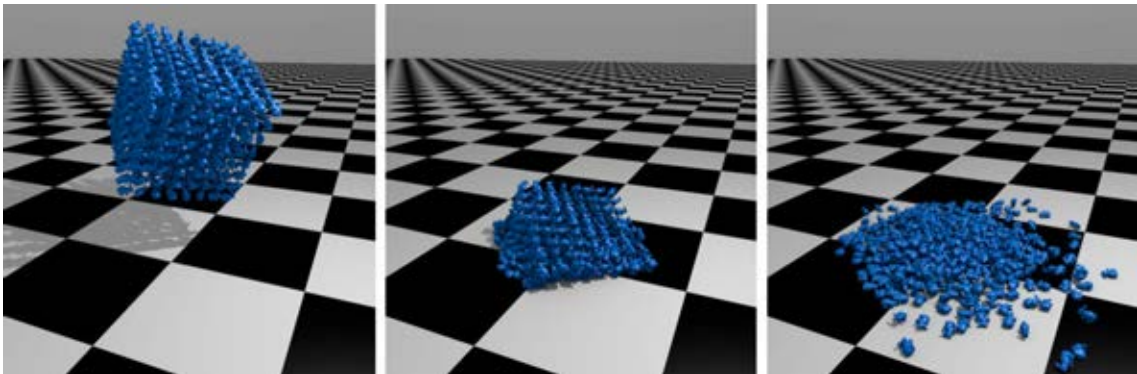


FIG. 1.3 – *Détection de collision par lancer de rayon, 512 objets tombent un sol plan* [LGA13a]

Enfin, nous avons proposé d'exploiter la cohérence temporelle pour améliorer les performances. Le résultat de la détection de collision (points de contacts) est généralement très

1. <https://www.youtube.com/watch?v=Qj6KC57Jhcw>



FIG. 1.4 – *Détection de collision par lancer de rayon pour la simulation de tissus [LGA15b]*

semblable entre deux pas de temps successifs. Suite à cette observation, Nous avons proposé un algorithme de lancer de rayon itératif qui intègre le résultat du pas précédent pour exploiter cette cohérence temporelle [LGA13a]. Cet algorithme peut être utilisé conjointement avec des algorithmes de lancer de rayon standard. Il permet de remplacer certains tests unitaires pour mettre à jour de manière incrémentale le résultat de la détection de collision. L'algorithme de lancer de rayon itératif est ajouté au pipeline en tant qu'alternative aux autres algorithmes de lancer de rayon et est utilisé prioritairement dû à son faible coût calculatoire comparé aux autres algorithmes.

1.1.3 Conclusion sur les modèles pour la performance

L'évolution des architectures matérielles comme les grappes de PC, les multi-coeurs ou multi-GPU nous ont permis d'améliorer la performance dans le cadre des applications complexes de RV. En particulier, nous avons proposé des solutions logicielles qui ont permis de porter des applications sur grappes de PC. Nous avons également étudié la détection de collision. Nous avons présenté des méthodes qui modifient le pipeline et des algorithmes associés qui permettent de gagner en rapidité.

1.2 Modèles de la collaboration distante

Au regard des architectures matérielles, nous nous sommes intéressés par la suite aux applications de RX elle mêmes et à la manière de les rendre plus performantes. Nous avons tout d'abord étudié la manière d'améliorer l'interaction à plusieurs dans un environnement virtuel partagé. La collaboration peut être locale ou distante. La collaboration locale étant un cas particulier de la collaboration à distance, nous avons plus particulièrement étudié cette dernière.

La collaboration distante en environnement virtuel ou mixte offre la possibilité à des utilisateurs situés à distance de se retrouver dans un environnement virtuel afin de réaliser des tâches ensemble. Alors que la collaboration distante peut être symétrique en réalité virtuelle, ce n'est clairement pas le cas en réalité mixte qui introduit de l'asymétrie par essence (comme par exemple des niveaux différents de virtualité). Les problématiques de la collaboration distante sont nombreuses comme la cohérence de l'environnement virtuel, la manière de représenter dans l'environnement virtuel les avatars des utilisateurs et leurs actions, ou plus globalement l'*awareness* ou la conscience des autres.

Nous avons d'abord étudié la cohérence de l'environnement virtuel et la manière de représenter l'espace d'interaction d'un utilisateur afin d'améliorer les performances de collaboration distante (Section 1.2.1). Nous nous sommes ensuite penchés sur les problématiques de l'asymétrie en collaboration distante avec l'étude de l'*awareness* (conscience) de

soi et des autres (Section 1.2.2). Nous avons également étudié l'influence sur un utilisateur d'un public distant ou co-localisé (Section 1.2.3). Enfin, nous concluons en Section 1.2.4.

1.2.1 Cohérence et espace d'interaction pour la collaboration distante

Afin d'améliorer la conception et l'utilisation d'environnements virtuels pour la collaboration distante, nous avons proposé des modèles qui formalisent les différents niveaux [FDGA10b] d'un environnement virtuel collaboratif. Le premier modèle s'attache à la manière d'adapter dynamiquement la distribution des données de l'environnement virtuel sur le réseau [FDGA10a]. Le second modèle définit une solution générique pour que des utilisateurs avec des dispositifs différents puissent collaborer efficacement dans un environnement virtuel [FCD⁺10].

Pour garantir que les utilisateurs perçoivent tous au même moment le même état de l'environnement virtuel sans dégradation de leurs capacités d'interaction, il faut une cohérence de l'environnement virtuel distribué. Une désynchronisation peut en effet être perturbante, par exemple lorsqu'un objet que l'on voit à un instant donné n'est déjà plus à cet endroit. Cette cohérence dépend de l'endroit sur le réseau où sont traitées les données relatives aux objets virtuels. Nous avons défini un modèle d'adaptation dynamique de la distribution des données [FDGA10a]. Trois modes de distribution ont été proposés en utilisant un paradigme de référents et proxys : un mode centralisé, un mode répliqué et un mode hybride. Le paradigme de référents et proxys permet de choisir pour chaque objet virtuel le mode le plus adapté selon son rôle. Ce choix de mode est modifié dynamiquement (par migration des objets) en fonction des actions des utilisateurs (manipulation ou co-manipulation de l'objet, proximité de l'objet d'un ou plusieurs utilisateurs, objet dans le champ de vision d'un ou plusieurs utilisateurs) ou de perturbations techniques (troubles réseau, ralentissement de machines). Les changements dynamiques de mode de distribution sont effectués à la demande des utilisateurs ou lors d'événements simples. À titre d'exemple, nous avons instancié ce modèle d'adaptation dynamique de distribution des données sur une architecture client-serveur.

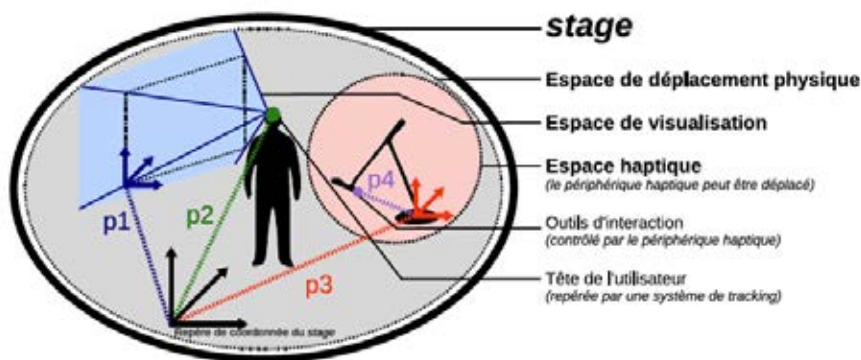


FIG. 1.5 – Le stage : différents espaces d'interaction de l'utilisateur [FCD⁺10]

La cohérence de l'environnement virtuel étant établie, nous nous sommes intéressés à la prise en compte de l'environnement réel autour des utilisateurs. La conscience de cet environnement est important pour interagir ou collaborer avec d'autres utilisateurs.

L'espace d'interaction réel de chaque utilisateur permet de faire percevoir à l'utilisateur et aux autres les capacités d'interaction et de perception. Nous avons défini le modèle de Cabine Virtuelle d'Interaction Immersive (CVII) qui intègre les espaces d'interaction réels des utilisateurs dans l'environnement virtuel [FCD⁺10]. Ce modèle est composé de deux parties : le *stage* et le *conveyor*. Le *stage* modélise l'environnement réel de l'utilisateur en hiérarchies d'espaces d'interaction (Fig. 1.5). Le *conveyor* intègre ce *stage* dans le monde virtuel, il a une position, une orientation et une échelle dans le monde virtuel, il définit la technique de navigation utilisée. Le modèle CVII fournit également un ensemble d'opérateurs afin de mettre en place des fonctionnalités d'interaction et de collaboration, des métaphores de collaboration, ainsi qu'une structure pour représenter les espaces d'interaction des utilisateurs dans l'environnement virtuel.

Ces modèles ont permis de développer le framework *Collaviz* [DDF⁺10] pour concevoir des environnements virtuels collaboratifs distribués entre des sites distants. Il a été déployé sur des dispositifs matériels allant de la station de travail à une salle immersive de réalité virtuelle. Le framework a été utilisé pour des applications de visualisation collaborative de données scientifiques [DDF⁺10] ou de navigation collaborative dans un bâtiment [DNF⁺12, DNF⁺14].

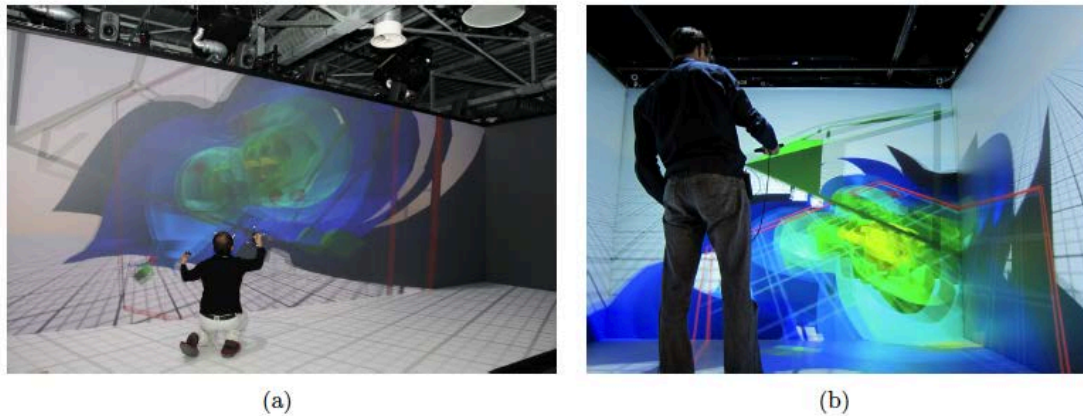


FIG. 1.6 – *Expérimentation collaborative distante: salle immersive de IRISA-Inria RBA à Rennes (a) et salle immersive de l'UCL à Londres (b) [FDGS12]*

À l'aide du framework *Collaviz*, nous avons réalisé des expérimentations sur l'exploration collaborative distante de données scientifiques en environnement virtuel entre Rennes et Londres (UCL) [FDGS12]. Nous avons comparé une manipulation mono-utilisateur avec une manipulation collaborative entre deux utilisateurs distants. La tâche consistait à placer un plan de *clipping* dans des données scientifiques en cherchant trois points d'intérêt présents à l'intérieur de ces données (Fig. 1.6). Nous avons montré que la manipulation collaborative à distance était plus efficace que la manipulation mono-utilisateur lorsque la tâche à réaliser était qualifiée de complexe (lorsque la distance séparant les trois points d'intérêt était plus importante).

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre des projets ANR COLLAVIZ A.2 et INFRAVISIONAIR A.1.

1.2.2 *Awareness* pour la collaboration distante asymétrique

Nous avons étudié la collaboration à distance en réalité mixte (RM), ce qui introduit de l'asymétrie dans la collaboration (niveaux de virtualité, dispositifs, points de vue multi-échelle ou rôle). Ces travaux ont été effectués dans le cadre de l'IRT [b<>com](#), projet ImData [A.3](#).

L'objectif a été de concevoir une manière de décrire les caractéristiques qui seraient responsables du maintien de l'*awareness* (conscience) de ses propres activités et de celles des autres. En effet, ces *feedbacks* sont les retours qui peuvent être perçus par les utilisateurs et interprétés afin de maintenir la conscience de l'environnement partagé.

Ainsi, nous avons introduit un modèle capable de différencier l'activité de l'utilisateur en termes d'intention dans la collaboration (si un utilisateur modifie seulement son propre état corporel, ou si un utilisateur interagit directement avec le contenu partagé de l'EV) et de décrire les réactions de l'EV partagé selon leurs sources et leurs significations (s'ils sont issus de l'affordance de l'EV, des interactions sur le contenu virtuel ou des activités des autres collaborateurs) [[LC16](#)]. La Fig. 1.7 présente le modèle pour un utilisateur en RM avec la boucle perception/décision/action. L'*awareness* de l'utilisateur est maintenue grâce à la combinaison des sorties de la simulation perçues aux travers des dispositifs de sortie. Pour un environnement collaboratif, les retours de l'interaction sur le contenu peuvent être issues d'interactions partagées sur le même objet. La représentation des autres permet de maintenir l'*awareness* de l'activité des autres pour une collaboration efficace.

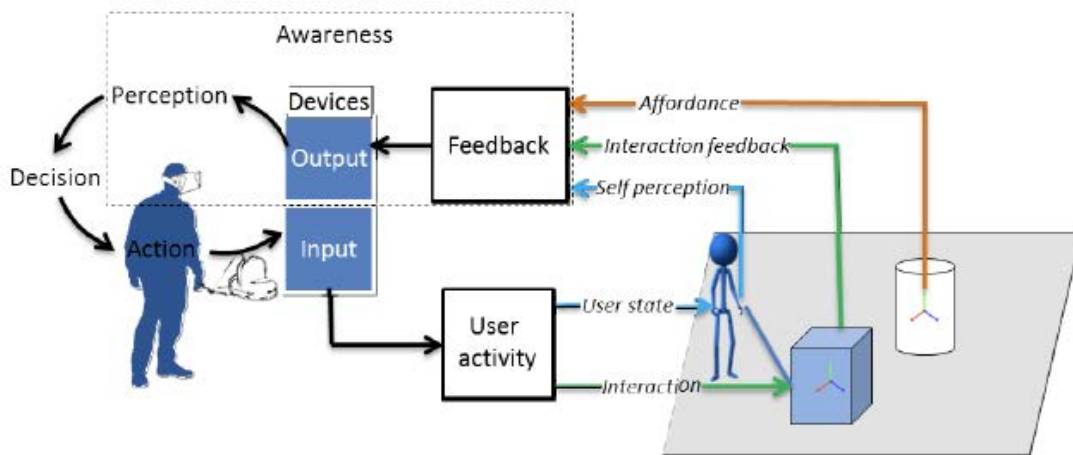


FIG. 1.7 – Modèle de système interactif avec E/S et boucle cognitive de l'utilisateur [[LC16](#)]

Nous avons ensuite étendu ce modèle pour permettre la description de situations plus complexes, en tenant compte de dimensions asymétriques comme les points de vue (dans un EV partagé multi-échelle) et le niveau de virtualité (si les collaborateurs partagent un EV avec des applications de RM hétérogènes). Nous avons introduit le concept d'espaces virtuels personnels qui prend en compte la synchronisation partielle d'un EV partagé entre des collaborateurs distants. Il gère le fait que le contenu virtuel peut être différent si les collaborateurs appartiennent à un EV multi-échelle et exécutent différents types d'applications de RM (par exemple, une collaboration à distance avec un utilisateur en RA et un utilisateur en RV) [[LCLR+16](#)]. La Fig. 1.8 présente le modèle qui décrit les systèmes collaboratifs asymétriques de RM avec un utilisateur en RA et un autre en RV. Les interactions en RA peuvent être réalisées sur des objets réels. Dans ce cas, l'utilisateur

de la RA peut percevoir directement les réactions de ces interactions sur les objets réels ; ces interactions génèrent une activité sur les objets réels qui est utilisée pour synchroniser les représentations virtuelles des objets réels utilisés pour maintenir la conscience des autres collaborateurs. Une caractéristique notable de ce modèle est que l'agrégation des feedbacks de l'espace réel et de l'espace virtuel pour chaque utilisateur donne lieu à des capacités perceptives équivalentes (fusion des contenus virtuels et réels). Ainsi, les collaborateurs sont capables de maintenir des niveaux de conscience équivalents et peuvent collaborer de manière compréhensible. Dans la Fig. 1.8, l'objet réel dans l'espace réel de l'utilisateur RA est représenté par le cube bleu pour l'utilisateur RV. Le cylindre rouge est un objet virtuel partagé représenté dans l'espace virtuel des deux utilisateurs. Nous pouvons noter que la représentation de l'utilisateur RA est seulement présente dans l'espace virtuel de l'utilisateur RV, il perçoit directement son espace réel (contrairement à l'utilisateur en RV).

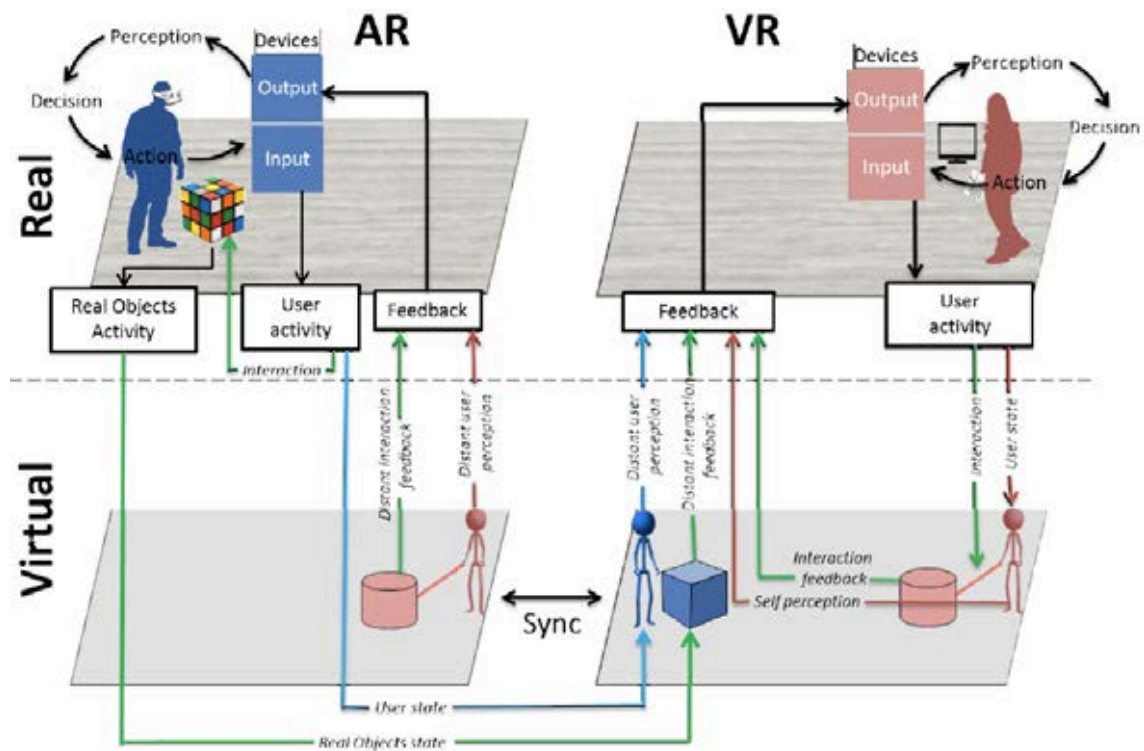


FIG. 1.8 – *Modèle de systèmes collaboratifs asymétriques de RM [LC16]*

Les environnements virtuels collaboratifs (CVE) visent à fournir à plusieurs utilisateurs un monde virtuel partagé dans lequel les utilisateurs ont conscience des autres. Nous nous sommes concentrés sur le manque de conscience mutuelle qui peut apparaître dans de nombreuses situations et nous avons évalué différentes manières de représenter l'utilisateur distant et ses actions dans l'environnement virtuel (VE) afin de comprendre sa perception et son processus cognitif [LCCD⁺15]. Nous nous sommes concentrés sur un cas courant consistant à estimer avec précision le moment où un utilisateur distant a analysé la signification d'un objet pointé à distance. Les résultats montrent, entre autres, que l'expertise des utilisateurs influence la façon dont ils estiment l'activité à distance et le type de stratégies appliquées. En particulier, nous avons identifié un groupe de sujets, appelés experts, qui sont capables d'adapter leurs stratégies pour estimer l'activité de l'autre utili-

sateur en fonction de la représentation de l'autre utilisateur et des retours disponibles. Au contraire, l'autre groupe, appelé novices, sélectionne principalement une stratégie d'estimation de l'activité des autres utilisateurs.

Nous avons appliqué le modèle d'*awareness* aux domaines du guidage à distance et de la co-manipulation [LCDG⁺19][LCAD⁺14]. Nous avons proposé un nouveau paradigme d'interaction appelé *Vishnu* qui vise à faciliter le guidage collaboratif à distance [LCDG⁺16][LCDG⁺15]. Nous prenons le cas d'un expert immergé en RV dans l'espace de travail distant d'un agent local aidé par une interface de RA. L'idée principale du paradigme Vishnu est de fournir à l'agent local deux bras virtuels supplémentaires contrôlés par l'expert distant qui peut les utiliser comme outils de guidage interactifs pour améliorer la procédure (Fig. 1.9). Notre étude pilote auprès des utilisateurs montre qu'il peut diminuer la charge cognitive par rapport à une approche habituelle basée sur la mise en correspondance d'informations 2D et délocalisées, et qu'il pourrait être utilisé par les agents pour effectuer des procédures spécifiques sans avoir besoin d'un expert local disponible.

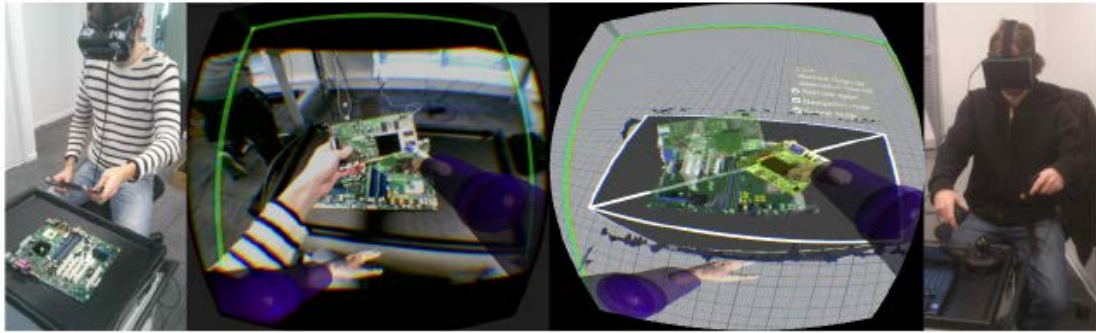


FIG. 1.9 – Paradigme Vishnu dans un scénario d'assemblage de carte mère. L'opérateur est à gauche et l'expert à droite [LCDG⁺16]

1.2.3 Influence d'un public distant ou co-localisé

Dans le cas des expériences virtuelles multi-utilisateurs, des mécanismes sociaux se mettent en place. Notre objectif était d'étudier les différences dans l'inhibition sociale (effets de déficience entraînés par la présence d'autrui) dans un environnement virtuel. Ces travaux ont été effectués dans le cadre de l'IRT b<>com, projet SmartCave A.3. Une expérimentation (57 participants, 16 femmes et 41 hommes) a été menée pour induire cet effet social [TML⁺19]. Nous avons considéré 3 groupes : un groupe de contrôle (l'utilisateur est seul) ; un groupe où l'utilisateur et le public sont dans la même pièce réelle (l'utilisateur voit les avatars du public) ; un groupe où l'utilisateur est seul dans une pièce et le public dans une autre pièce (l'utilisateur voit les avatars du public) (Fig. 1.10). Les participants ont été réparti entre ces 3 groupes. L'utilisateur et le public partageaient le même environnement virtuel (EV) et sont tous munis de casques de RV.

Les performances et les mesures subjectives (ressenti, perception) ont été obtenues au cours d'une tâche inconnue et réputée difficile (découvrir une règle de catégorisation de nombres en temps limité). Les résultats des deux conditions ont été comparés à une condition de contrôle (c'est-à-dire l'utilisateur seul). Deux résultats majeurs ont été trouvés et aucun effet de genre n'a été détecté [TML⁺20].



FIG. 1.10 – *Utilisateur : seul (à gauche), audience colocalisée (au milieu) ou distante (à droite).* [TML⁺20]

Le premier résultat a montré que l’inhibition sociale semble se produire lorsque les utilisateurs de la RV sont en présence d’un public. Le deuxième résultat a montré que lorsque le public est physiquement dans une autre pièce que la personne, l’audience semble affecter encore plus fortement les personnes d’inhibition sociale.

Plus précisément, la présence d’observateurs entraîne une différence dans les réactions des utilisateurs par rapport à la situation où ils sont seuls dans l’EV. En effet, l’amélioration de la performance s’est produite plus lentement lorsque l’audience était colocalisée que lorsqu’aucune audience n’était présente, et encore plus lentement avec une audience distante qu’avec une audience colocalisée. Une amélioration plus lente avec un public distant pourrait être due à une perception plus faible des autres par rapport à un public colocalisé.

1.2.4 Conclusion sur les modèles de la collaboration distante

Nous avons présenté différents modèles et évaluations pour la collaboration distante. Dans le cadre de collaboration en RV, pour la cohérence des données, nous avons proposé un modèle de distribution des données qui s’adapte dynamiquement en fonction des actions de l’utilisateur. Les actions de l’utilisateur sont effectuées dans un espace d’interaction réel. Pour que les utilisateurs soient conscient de cet espace, nous avons défini le modèle de la CVII. Ces modèles sont intégrés dans le framework Collaviz qui nous a permis de montrer que pour certaines tâches de manipulation de plan de coupe, la collaboration est plus efficace que d’effectuer la tâche seul.

Dans le cadre de collaboration distante asymétrique, nous avons proposé un modèle de la conscience de soi et des autres dans un environnement mixte. Nous avons étudié la manière de représenter les actions d’un utilisateur distant et nous avons évalué le cas qui consiste à estimer avec précision le moment où un utilisateur distant a analysé la signification d’un objet pointé à distance. Il s’avère que selon l’expertise de l’utilisateur les stratégies diffèrent. Nous avons également introduit une métaphore d’interaction collaborative *Vishnu* dont l’évaluation montre qu’elle facilite le guidage à distance de gestes.

Enfin, nous avons fait une étude en RV sur l’influence d’un public distant ou co-localisé sur la tâche d’un utilisateur. Nous avons montré que l’inhibition sociale est la plus forte

lorsque l'utilisateur est en présence d'un public distant.

Les applications de RX comprennent au moins un utilisateur qui interagit dans l'environnement. Cet utilisateur ou collaborateur est un des composants de l'application et nécessite une abstraction sous la forme d'un modèle.

1.3 Modèles du collaborateur

Une application de RX est constituée d'utilisateurs et également d'humains virtuels. Les humains virtuels et les utilisateurs réels sont souvent considérés dans la littérature comme deux entités différentes concernant leur gestion. Cependant, la collaboration et l'interaction entre les utilisateurs et les humains virtuels dans les environnements virtuels est un défi crucial, par exemple pour les environnements virtuels collaboratifs de formation (CVET). Un projet de formation implique souvent plusieurs acteurs n'ayant pas le même rôle : les apprenants, les coéquipiers et souvent un formateur. Pourtant, l'un des principaux avantages des CVET est de permettre aux utilisateurs de se former même si le nombre de personnes requis par la procédure n'est pas disponible [GGA09]. Les agents virtuels sont donc un véritable atout dans l'environnement virtuel collaboratif pour la formation car ils peuvent remplacer les membres d'équipe manquants.

L'échange d'avatars, c'est-à-dire le fait pour un utilisateur d'échanger d'avatar avec un humain virtuel (ou autre utilisateur), est donc une tendance prometteuse dans les environnements virtuels multi-acteurs. Il offre de nouvelles possibilités aux utilisateurs, comme le contrôle d'un avatar différent pour une action spécifique, la récupération de connaissances appartenant à un humain virtuel (ou utilisateur) particulier, la résolution de conflits et de situations d'impasse ou même l'aide à un autre utilisateur. Plusieurs études révèlent que l'échange d'avatars est un moyen efficace d'améliorer la formation [RL08].

Nous avons proposé de considérer les humains virtuels et les humains réels comme deux aspects du même concept et nous avons ainsi défini un point d'entrée commun dans le monde virtuel pour les acteurs qu'ils soient réels ou virtuels.

Pour ce faire, nous présentons tout d'abord un modèle unifié d'interaction dans le cadre de la collaboration (Section 1.3.1), puis un modèle unifié d'humain réel et virtuel (Section 1.3.2) qui permet l'échange d'avatars. Nous évaluons différentes métaphores d'échange (Section 1.3.3). Enfin, nous présentons l'intégration de ces concepts dans une application de formation virtuelle collaborative (Section 1.3.4).

Ces travaux ont été essentiellement effectués dans le cadre du contrat NEXTER Training A.4 et des projets ANR CORVETTE et FUI SIFORAS A.2.

1.3.1 Modèle unifié d'interaction collaborative

Nous avons étudié les interactions collaboratives dans les environnements virtuels de formation, et plus particulièrement les interactions entre les humains réels et les humains virtuels travaillant en équipe. L'objectif étant d'unifier ces interactions pour les humains réels et virtuels.

Nous avons proposé un nouveau modèle d'interaction collaborative C-STORM (basé sur le modèle mono-utilisateur STORM [MGA07]) et un ensemble d'outils qui décrivent et définissent ces interactions [SLGA12].

C-STORM permet d'interagir sur un même objet de manière simultanée pour des utilisateurs distincts, rendant possible une interaction collaborative sur cet objet. Pour

cela, C-STORM agrmente les objets de nouvelles possibilités ce qui leur donne la capacité de contrôler d'autres objets mais surtout d'en partager le contrôle avec plusieurs sources. C-STORM introduit ainsi deux nouvelles capacités : la capacité Interacteur et la capacité Objet Interactif. Par exemple la main de l'utilisateur a la capacité Interacteur et un tournevis la capacité Objet Interactif. L'Interacteur ajoute aux objets C-STORM la capacité de prendre le contrôle d'objets possédant la capacité d'Objet Interactif. Ce dernier offre alors une liste de paramètres contrôlables et traite les demandes reçues de la part de l'Interacteur. Ce mécanisme confère aux utilisateurs la capacité de prendre le contrôle d'objets dans l'environnement virtuel. Afin de rendre cette interaction collaborative, chaque Objet Interactif peut-être manipulé par plusieurs Interacteurs en même temps, chaque Interacteur pouvant être contrôlé par un acteur différent de la simulation.

Dans le cas d'accès simultanés concurrents à un même paramètre par des Interacteurs, l'Objet Interactif est agrémenté d'une méthode de fusion des différentes données qu'il reçoit pour modifier le paramètre. De nombreuses méthodes de fusion sont possibles, par exemple la moyenne.

La construction de notre nouveau modèle d'interaction collaborative vise à décrire des interactions et des comportements collaboratifs génériques afin d'unifier les humains virtuels (HV) et les humains réels (HR) en tant qu'interacteurs et utilisateurs.

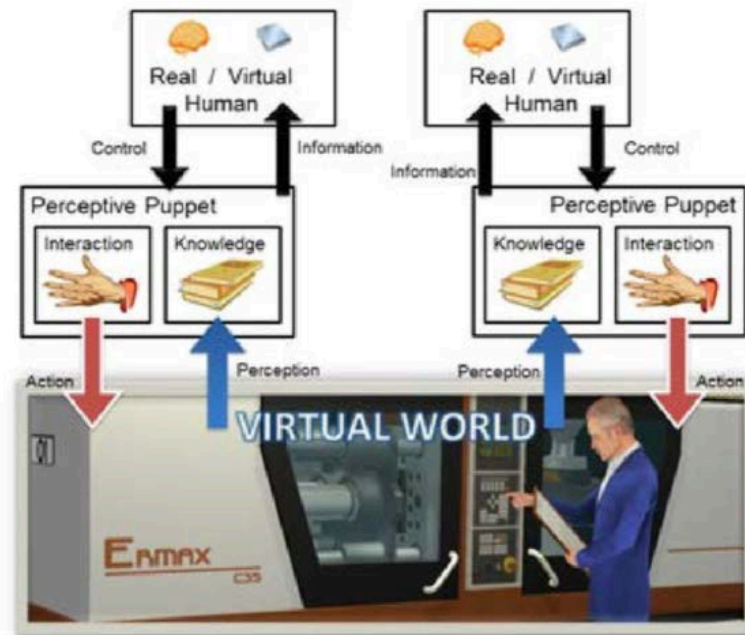
Du point de vue du génie logiciel, ce modèle d'unification simplifie le processus de conception. Toutes les actions sont effectuées via ce modèle, sans tenir compte de la nature réelle ou virtuelle de l'utilisateur qui interagit. Elles ne doivent donc plus être définies spécifiquement.

Du point de vue de l'utilisation, les HR qui utilisent le système peuvent collaborer avec les autres coéquipiers de l'environnement virtuel tout en ignorant leur nature réelle, sans pour autant entraver leur tâche.

1.3.2 Modèle unifié d'humain virtuel et réel

Le modèle unifié d'interaction étant défini, nous avons cherché à unifier la notion d'humain virtuel et réel. Nous avons introduit la notion de marionnette perceptive (Fig. 1.11), qui unifie les humains réels et virtuels en une entité commune contenant ses propres connaissances [SLGLA13]. Cette entité joue le rôle de médiateur entre les membres de l'équipe, réels ou virtuels, et l'environnement virtuel. Elle est capable de percevoir le monde virtuel dans lequel elle évolue, récupérer des connaissances à partir des éléments perçus, et interagir avec d'autres objets de ce monde. Elle est en revanche dénuée de tout processus de décision et ne peut interagir d'elle-même avec le monde virtuel. La marionnette perceptive et l'entité qui la contrôle sont reliées par un lien d'interaction qui fonctionne de la même manière pour les humains réels et les humains virtuels [SLGA12].

De plus, la marionnette perceptive possède ses propres connaissances et canaux de perception, indépendamment de tout membre de l'équipe qui la contrôle. Les capacités de perception d'une marionnette perceptive sont sa principale source d'information. Elle est composée de deux parties : les canaux sensoriels et le pipeline de filtrage. Les canaux sensoriels acquièrent les données de l'environnement virtuel grâce à des capacités de perception telles que la vision ou le son. Le pipeline de filtrage filtre ensuite les données selon différents critères tels que la pertinence, la proximité spatiale ou l'utilité dans la tâche en cours. En donnant à la marionnette perceptive son propre savoir-faire et ses propres capacités de perception, nous nous assurons que les données recueillies sont indépendantes du contrôle des membres de l'équipe. Cela nous assure que lorsqu'un échange est effectué, les connaissances de la marionnette perceptive sont cohérentes. Cette marionnette est un protocole d'échange qui consiste essentiellement à échanger les contrôles du modèle d'in-

FIG. 1.11 – *La Perceptive Puppet et sa relation avec le monde virtuel*

teraction entre les acteurs.

Pour aller plus loin, nous avons proposé une nouvelle entité, le *Shell*, qui vise à abstraire un acteur de son incarnation dans le monde virtuel grâce à l'ajout d'un module d'acquisition qui génère et transmet les connaissances [LNGA13]. Ainsi, grâce à cette entité, les utilisateurs et les agents virtuels sont en mesure de collaborer de la même manière dans l'application. En plus du contrôle de l'incarnation, le *Shell* contient des connaissances et fournit des éléments d'interaction. Les utilisateurs et les agents virtuels peuvent accéder à ces connaissances et les utiliser de manière homogène pour les aider à exécuter la procédure.

FIG. 1.12 – *L'architecture du Shell [LNGA13]*

Le *Shell* sépare l'esprit pensant (c'est-à-dire l'acteur) de son incarnation dans l'environnement virtuel (c'est-à-dire son mannequin) (Fig. 1.12). Il met en œuvre un modèle d'interaction à contrôler et pour contrôler le mannequin auquel il est associé. Il contient un modèle de connaissance basé sur des composants d'acquisition et une base de données structurées. La connaissance est ainsi accumulée au cours de la procédure et accessible par l'acteur qui contrôle le *Shell*. Ces connaissances peuvent être utilisées afin d'échanger des incarnations entre les acteurs des deux natures (réelle ou virtuelle). Cela permet de comprendre le processus de décision d'un membre de l'équipe ou de renforcer la collaboration avec les autres membres.

Un tel mécanisme résout deux fonctionnalités importantes : la possibilité d'échanges dynamiques d'incarnation entre les humains réels et les humains virtuels et la continuité des actions des membres de l'équipe après un échange [BBLN⁺14].

1.3.3 L'échange d'avatars

Nous avons montré précédemment que l'échange d'avatar (le fait pour un utilisateur d'échanger d'avatar avec un humain virtuel ou autre utilisateur) est possible dynamiquement. Cependant, aucune étude n'a porté sur la manière de représenter efficacement un tel échange.

Nous avons évalué les paramètres cruciaux qui rendent la représentation d'un échange d'avatars (métaphore d'échange) plus compréhensible et mieux perçue par l'utilisateur [LBBLE⁺14] (vidéo²). Pour ce faire, nous avons effectué deux expérimentations. La première expérience s'est concentrée sur les échanges dont l'utilisateur a été témoin (Fig. 1.13), tandis que la seconde s'est concentrée sur les échanges déclenchés par l'utilisateur pour son avatar (Fig. 1.14).



FIG. 1.13 – Les trois métaphores utilisées (a, b et c) [LBBLE⁺14]

La première expérimentation a été effectuée par 54 participants que nous avons répartis en 3 groupes (un par métaphore) et vise à comparer 3 métaphores (*Flickering avatar*, *Ghost translation* et *Popup notification* Fig. 1.13). Le participant effectue une tâche scénarisée dans laquelle il est témoin d'échanges. Les résultats principaux montrent que la métaphore b (*Ghost translation*) est plus facile à comprendre que les métaphores a et c, elle est perçue comme une bonne idée et est plus esthétique que la métaphore c (*Popup notification*). De plus, elle est perçue comme la plus originale des trois. La métaphore c est plus ennuyeuse et moins agréable que les autres. Par contre, la métaphore c a permis d'effectuer la tâche plus rapidement.

2. <https://www.youtube.com/watch?v=Yu4YpGzKXes>



FIG. 1.14 – L'utilisateur peut déclencher l'échange de son avatar avec l'un des trois humains virtuels de l'environnement [LBBLE⁺ 14]

Metaphor	Camera motion	Visual effect	Symbol
M_1	linear (\rightarrow)	with (fl)	$M_1(\rightarrow, \text{fl})$
M_2	linear (\rightarrow)	without (\emptyset)	$M_2(\rightarrow, \emptyset)$
M_3	external-PoV (\curvearrowright)	with (fl)	$M_3(\curvearrowright, \text{fl})$
M_4	external-PoV (\curvearrowright)	without (\emptyset)	$M_4(\curvearrowright, \emptyset)$
M_5	none (\emptyset)	without (\emptyset)	$M_5(\emptyset, \emptyset)$

FIG. 1.15 – Les 5 métaphores utilisées (selon un mouvement de caméra, linéaire ou courbe, et la présence ou non d'un effet visuel) [LBBLE⁺ 14]

La seconde expérience a été réalisée par 42 participants et vise à comparer 5 métaphores définies selon un mouvement de caméra, linéaire ou courbe, et la présence d'un effet visuel (composé de la fusion des deux métaphores *Flickering avatar* et *Ghost translation*). Le participant déclenche des échanges lui-même afin de comparer les métaphores 2 à 2 (Fig. 1.15). Les résultats principaux montrent que l'utilisation du mouvement linéaire de la caméra (M_1 , M_2) est préférée à l'utilisation du mouvement courbe (M_3 , M_4). De plus, l'utilisation d'un effet visuel aide les utilisateurs à comprendre l'échange (M_1 , M_3). Certains participants ont cependant estimé que l'effet visuel les distrayait. Enfin, la métaphore la plus simple, sans mouvement de caméra ni effet visuel (M_5), est celle qui a été le plus souvent classée en tête par les utilisateurs à cause de sa vitesse d'exécution et parce qu'elle a été jugée ordinaire. Cependant cette métaphore a été jugée difficile à comprendre pour certains participants.

Ces résultats sont en accord avec les études sur les déplacements dans les environnements virtuels [BKH97], l'échange pouvant en effet être considéré comme un cas particulier de navigation dans un environnement virtuel.

Ces expériences nous ont donc permis d'émettre plusieurs recommandations concernant la conception de métaphores d'échange afin qu'elles soient compréhensibles et bien perçues. Tout d'abord, les expériences ont confirmé que différents paramètres doivent être pris en compte pour définir la métaphore d'échange selon que l'utilisateur est impliqué ou non dans l'échange. Dans les deux cas, cependant, l'utilisation d'effets visuels aide généralement à expliquer le mécanisme d'échange mais pourrait distraire l'utilisateur de sa tâche. Deuxièmement, plusieurs métaphores peuvent être proposées en fonction du niveau de familiarité de l'utilisateur final avec la RV. Des métaphores compréhensibles et familières doivent être proposées aux utilisateurs novices, alors que les utilisateurs experts préféreront des métaphores efficaces. De plus, une phase d'apprentissage devrait être disponible pour les utilisateurs novices afin de leur permettre d'utiliser des métaphores plus efficaces une fois qu'ils sont habitués au mécanisme d'échange.

Enfin, les métaphores doivent être adaptées à l'application ciblée : les métaphores conviviales, bien qu'elles soient appréciées par les utilisateurs, conduisent souvent à un temps d'accomplissement de la tâche plus long, en particulier pour les utilisateurs novices, même si aucune différence n'a été trouvée en termes de facilité d'utilisation ou de conscience de l'échange. De plus, nous affirmons que la métaphore doit être adaptée au contexte de l'échange voire de l'application visée. Un exemple d'une telle métaphore d'échange dépendant du contexte, basée sur la distance, est présent dans le jeu vidéo *Grand Theft Auto 5*. Une métaphore proche de M_5 (sans mouvement de caméra ni effet visuel) est utilisée lorsque les avatars sont proches les uns des autres et une métaphore utilisant le principe de M_4 (mouvement de caméra courbe et pas d'effet visuel) est utilisée lorsque les personnages sont éloignés.

1.3.4 Formation virtuelle collaborative

En collaboration avec l'ENIB-CERV et le CEA List, nous avons intégré les notions précédentes dans un modèle de CVET axé sur l'abstraction de la nature réelle ou virtuelle de l'acteur pour définir un modèle de collaboration homogène.

Nous avons présenté un modèle d'agents autonomes qui répond aux différents besoins des CVET. Cet agent est capable de s'associer de manière transparente avec des agents virtuels ainsi qu'avec des utilisateurs [LCG⁺14] (vidéo³). Cette collaboration est possible à différents niveaux, depuis les actions de collaboration jusqu'à une conversation collaborative (analyse et synthèse de la parole) et l'échange de connaissances. Sans parler de l'atout précieux que constitue l'utilisation de la physique qui contribue à renforcer l'immersion de l'utilisateur au cours de la collaboration. L'architecture globale est présentée en Fig. 1.16. Les agents autonomes communicants et des utilisateurs présents dans l'environnement virtuel collaborent par l'intermédiaire de leurs *Shells*. La Fig. 1.17 montre une utilisatrice qui co-manipule avec un humain virtuel un moule d'une machine de plasturgie.

Tout d'abord, nous avons utilisé notre modèle de collaboration d'interaction. Ce modèle rassemble le contrôle d'un avatar et les connaissances qui lui sont associées afin d'abstraire la nature réelle ou virtuelle des acteurs. Nous avons également proposé une nouvelle approche de changement de rôle afin que les acteurs puissent échanger leurs rôles pendant la formation. Par exemple, un formateur effectuant une procédure peut choisir un apprenant et échanger leurs rôles, permettant à cet apprenant d'effectuer une partie de la procédure. Un formateur pourrait prendre le contrôle d'un agent autonome et aider ou perturber le travail des apprenants en modifiant les conditions de formation en temps réel et ce sans que les apprenants ne remarquent l'intervention active de leur formateur.

3. <https://www.youtube.com/watch?v=HNHID8hN71o>

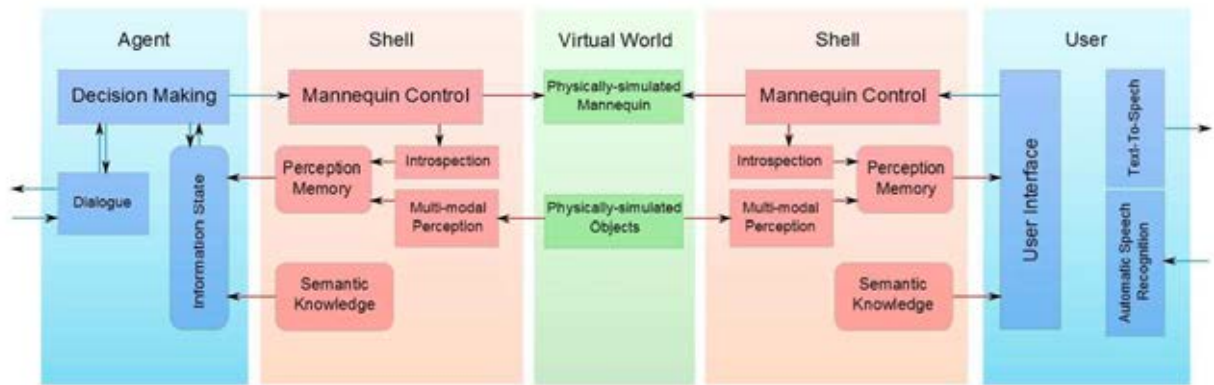
FIG. 1.16 – Architecture globale du CVET [LCG⁺ 14]

FIG. 1.17 – Co-manipulation entre une utilisatrice et un humain virtuel, plateforme Immersia @Irisa

De plus, avec l'ENIB-CERV, un nouveau modèle d'agent de communication qui gère les contraintes spécifiques des CVET a été défini. Grâce à ces comportements communicatifs, les agents sont désormais capables de s'engager dans des plans partagés et de produire et d'interpréter des actes de dialogue afin d'accomplir des engagements concernant la réalisation d'objectifs collectifs et la coordination de leurs actions avec les utilisateurs et d'autres agents autonomes. En outre, ils sont en mesure de partager leurs connaissances sur la procédure ou sur les éléments de l'environnement simulé avec d'autres apprenants, ce qui constitue un réel avantage pour les utilisateurs car ils peuvent leur demander de l'aide comme ils le feraient avec un véritable coéquipier.

Enfin, avec le CEA List, nous avons proposé d'augmenter l'expérience de l'utilisateur pendant la formation en utilisant une simulation physique des humains et des objets du monde virtuel. Cette contribution vise à intensifier la fidélité des retours donnés à l'utilisateur et lui permet d'interagir plus naturellement avec l'environnement. Ainsi, elle peut être considérée comme une base de référence des éléments de raisonnement qui peuvent être pris en compte lors de la conception de CVET.

1.3.5 Conclusion sur les modèles du collaborateur

Nous avons étudié le modèle du collaborateur avec comme objectif de permettre l'échange transparent entre humains réels et virtuels dans une application de RV. Nous avons tout d'abord proposé un modèle unifié d'interaction et un modèle d'unification de la gestion des humains virtuels et réels. Nous avons montré que ces deux modèles rendent l'échange possible. Pour que l'échange soit compréhensible par les utilisateurs, nous avons évalué différentes métaphores d'échange et déduit des préconisations quant à leur conception et leur utilisation. Enfin, pour valider l'ensemble de ces concepts, nous les avons intégré dans un environnement de formation collaboratif en RV enrichi par un modèle de communication entre les humains virtuels et réels. Nous avons utilisé de la physique sur l'environnement virtuel (scène 3D et humain virtuel) pour rendre l'application plus fidèle ou réaliste.

Le collaborateur est un des composants d'une application de RX qui interagit avec un environnement 3D. Nous avons, par la suite, étudié la manière de modéliser cet environnement.

1.4 Modèle de l'environnement 3D

Une application de RX est conçue à partir d'un environnement 3D comprenant des objets avec lesquels l'utilisateur peut interagir et qui peuvent interagir entre eux. Nous avons étudié la manière d'abstraire cet environnement 3D et les liens possibles entre les éléments de cet environnement. Ces abstractions doivent faciliter les développements d'applications de RX et permettre une meilleure réutilisation (Section 1.4.1). Nous nous sommes également intéressés à des utilisateurs non développeurs comme par exemple des experts métier afin de leur permettre de créer un environnement 3D (Section 1.4.2). Nous avons notamment utilisé la richesse descriptive de certaines structures de données comme les ontologies ou les données issues du domaine de la construction de bâtiments (BIM) pour alimenter les données de l'environnement 3D (Section 1.4.3). Enfin, nous concluons dans la Section 1.4.4.

1.4.1 Environnement 3D réactif RV

Des modèles sont proposés pour unifier l'interaction en environnement 3D afin de concevoir des applications de RX indépendamment de tout dispositif [CBK17]. Un certain nombre de travaux proposent une formalisation d'un environnement virtuel et des abstractions pour des environnements informés. Par exemple, le projet STEVE [JR97] a été conçu dans le contexte de la formation à la maintenance navale, autour d'un simulateur du comportement des objets pour l'interaction et d'un agent pédagogique. Concernant l'interaction Kallmann [Kallmann 2001] a introduit la notion de *smart object* permettant de représenter la réaction des objets lors de l'interaction de l'utilisateur. La notion d'objet-relation permettant de généraliser l'interaction a été également largement utilisée, comme par exemple avec *Mascaret* [QBEC03], *Cause and Effects* [LC10], ou encore *Domain-DL* [LCL⁺13]. Ce dernier modèle permet de découpler l'interaction des objets manipulés. Un utilisateur est considéré comme un objet particulier, ce qui facilite la gestion des interactions multi-utilisateurs [GMG⁺08]. Le modèle STORM [MGA07] est un exemple mono-utilisateur et il a été étendu au contexte collaboratif (plusieurs utilisateurs) avec C-STORM [SLGA12].

Cependant, ces différents modèles sont en général liés au domaine d'application et ils ne permettent pas suffisamment de ré-utilisation.



FIG. 1.18 – L'EV et les deux moteurs #FIVE (bleu) peuvent utiliser à la fois des composants réutilisables personnalisés (rouge) et des éléments spécifiques à l'application (vert) [BGB⁺15]

Afin de pallier à ces limitations, nous avons proposé une nouvelle génération de modèle d'objet-relation : *Framework for Interactive Virtual Environments* (#FIVE). Il est conçu pour le développement d'environnements virtuels interactifs et collaboratifs [BGB⁺15].

Ce modèle a été conçu pour faciliter et accélérer la conception et le développement d'applications de réalité virtuelle. Il a été défini en mettant constamment l'accent sur la réutilisabilité avec le moins d'hypothèses possibles sur l'application finale dans laquelle il pourrait être utilisé (Figure 1.18).

Son implémentation a fait l'objet d'une intégration à Unity qui est un moteur de jeu largement utilisé pour le développement d'applications de RX.

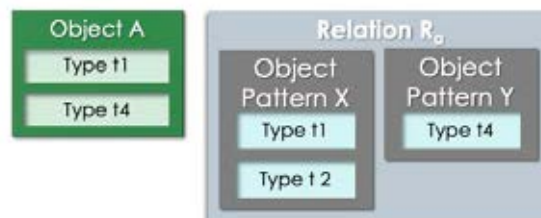


FIG. 1.19 – Moteur de relation : deux concepts, un objet A (types t_1 et t_4) une relation R_a (qui relie deux patterns d'objets : l'un qui possède t_1 et t_2 et l'autre t_4)

Le modèle #FIVE est basé sur deux concepts principaux, les modèles d'objet qui associent un ensemble de types à chaque objet et les modèles d'actions qui correspondent aux relations possibles entre modèles d'objets. Les types sont des attributs, des propriétés ou capacités qu'un objet (vis, tournevis, clé, tige filetée, écrou) possède (vissable, saisissable, diamètre de 12, type male/femelle) et qui sont nécessaires pour l'impliquer dans une relation. Les types #FIVE sont attachés à des objets.

Ainsi dans la Fig. 1.19, le modèle d'objet (à gauche) définit un objet A qui a les types t_1 et t_4 et le modèle de relation (à droite) définit la relation R_a entre les deux modèles d'objets X et Y avec X de type t_1 et t_2 , et Y de type t_4 . L'objet A peut être impliqué dans la relation R_a en tant qu'instance du modèle d'objet Y car il possède le type t_4 , mais pas en tant qu'instance du modèle d'objet X car il ne possède pas le type t_2 .

Le modèle #FIVE permet de décrire des propriétés, des relations entre les objets

pour définir les interactions de manière génériques (comme par exemple prendre/poser). L'implémentation de #FIVE est composée de plusieurs modules, dont deux modules de base : le moteur de relation et le moteur d'interaction collaboratif. Le moteur de relation gère les relations entre les objets de l'environnement. Le moteur d'interaction collaboratif gère la manière dont les utilisateurs peuvent contrôler les objets de manière collaborative.

Quelle que soit l'implémentation de l'environnement virtuel (EV), #FIVE :

- fournit une boîte à outils qui facilite la recherche des actions et propriétés possibles des objets dans l'EV, sous forme de requêtes ;
- fournit une boîte à outils qui facilite le paramétrage et la gestion des interactions collaboratives dans un EV ;
- est conforme à la distribution de l'EV sur différentes configurations ;
- propose des directives pour créer efficacement un EV collaboratif et interactif.

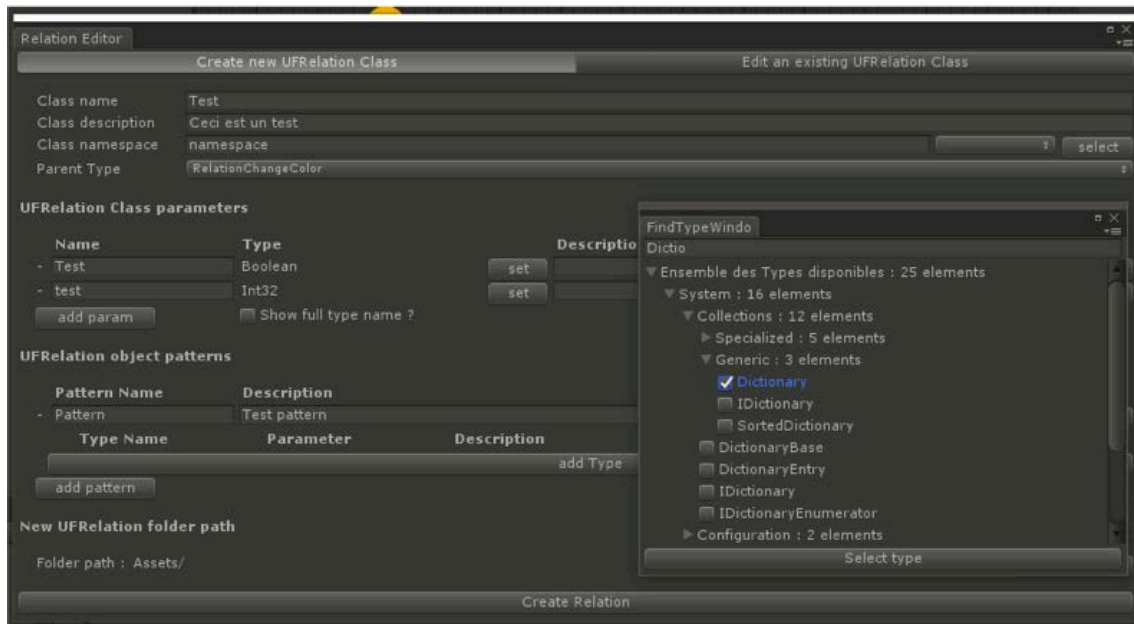


FIG. 1.20 – Éditeur de relation intégré à Unity

Considérons dans l'EV, une tige filetée avec deux extrémités filetées et un écrou compatible. Afin de les impliquer dans une relation de vissage régie par le moteur de relation, nous devons attribuer des types à ces deux objets. La tige filetée O_{Rod} a deux extrémités filetées, elle peut être typée deux fois. Elle aura aussi un type *mâle* t_{male} pour chaque extrémité. De la même manière, l'écrou (O_{Nut}) aura un type *femelle* $t_{femelle}$ pour chaque extrémité.

Ensuite, pour pouvoir réaliser l'action Visser, nous définissons la relation R_{Screw} . Cette relation relie deux objets ; l'un doit être de type féminin et l'autre de type masculin. Nous définissons la relation R_{Screw} avec deux modèles d'objets OP_x et OP_y qui définissent ces exigences comme suit :

$$R_{Screw} = (OP_x(t_{male}), OP_y(t_{female}))$$

La relation R_{Screw} est possible de quatre manières car la tige filetée et l'écrou ont deux extrémités chacun. Tout autre objet du monde qui possède les types t_{male} et t_{female} peut être impliqué dans la relation R_{Screw} . Il est également possible et même souhaitable d'ajouter des informations plus précises pour décrire par exemple la compatibilité de diamètre

et de pas (au sens pas de vis) pour la relation Visser.

Dans un exemple d'application de mécanique, les vis, les écrous, les clés à molette et autres outils sont définis une bonne fois pour toute avec les bons types et paramètres. Ensuite, afin de définir un système de montage, il faut décrire un chainage des interactions pour lier la main de l'utilisateur, la clé avec laquelle il va interagir, l'écrou qu'il va vouloir visser et la tige fileté.

Le moteur fonctionne par résolution de différentes requêtes afin de faire automatiquement les liens entre les instances d'objets de la scène 3D :

- quels objets peuvent interagir avec l'objet que l'utilisateur a en main ?
- dans quelles relations des objets ciblés peuvent intervenir ?
- quels objets peuvent réaliser cette relation ?
- quels objets manquent à l'utilisateur pour réaliser une relation particulière ?

Dans l'implémentation de #FIVE, les objets qui répondent à ces requêtes peuvent être mis en évidence (peut être paramétré par le développeur) dans l'environnement 3D afin de guider l'utilisateur lors de ses interactions.

Nous avons également développé et intégré une interface d'édition de relation dans l'environnement de développement Unity pour permettre à un développeur ou un utilisateur plus novice de définir les types et les relations plus aisément qu'avec du code C#. L'éditeur de relation (Figure 1.20) permet de définir les paramètres de la relation puis d'en générer automatiquement le code.

Le framework #FIVE basé sur le modèle objet-relation définit un environnement 3D réactif complet dans le cadre de la réalité virtuelle destiné à la fois aux développeurs et aux utilisateurs moins expérimentés en informatique grâce à l'interface graphique.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet ANR CORVETTE A.2.

1.4.2 Environnement 3D réactif RA

De la même manière, nous avons étudié la création d'environnement 3D réactif dans le cadre de la réalité augmentée. Nous faisons également le constat que généralement, dans la création d'applications, une grande partie du temps est consacrée à des discussions entre le concepteur (ou l'expert du domaine), qui porte les besoins de l'application, et le développeur, qui détient les connaissances nécessaires à sa création.

Pour la méthode que nous proposons, deux pré-requis sont nécessaires. Tout d'abord nous considérons que nous avons à disposition une bibliothèque de reconnaissance d'objets réels. Ensuite, les objets réels sont pré-traités avec cette bibliothèque pour faciliter le *tracking*. Avec ces pré-requis, nous avons donc conçu une nouvelle méthodologie de créations d'interactions en réalité augmentée, appelée le *définir en faisant*, supportée par un outil auteur à l'usage des concepteurs et des experts du domaine [LGR⁺19a] (vidéo⁴). Cet outil accélère la production de contenu interactif augmenté, tout en étant évolutif en fonction des besoins de chaque application.

Pour rendre les interactions facilement accessibles à ces concepteurs, nous avons étendu le modèle #FIVE pour l'adapter à la réalité augmentée, en ajoutant le fait qu'un objet soit réel ou virtuel.

Chaque objet réel est représenté dans l'environnement par un objet virtuel qui porte le type *Alias*. Le type *Alias* indique que la position de l'objet virtuel doit être mis à jour en fonction des informations de l'objet réel qu'il représente en utilisant la bibliothèque de

4. <https://www.youtube.com/watch?v=nkDBkDfZlgt=15s>

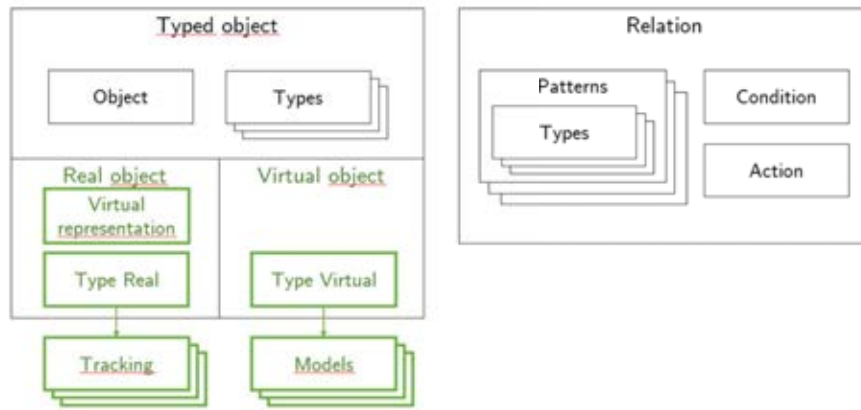


FIG. 1.21 – Le modèle objet-relation étendu pour la RA (en vert les extensions apportées) [LGR⁺ 19a]

tracking. De plus, pour chaque objet réel, nous avons introduit la notion de zone d'interaction qui permet de spécifier la partie de l'objet avec laquelle il est possible d'interagir dans l'environnement virtuel. Enfin, nous introduisons également un type *Virtual* pour décrire le comportement d'un objet purement virtuel. Ces types sont intégrés au modèle objet-relation (Figure 1.21).



FIG. 1.22 – L'inspecteur des types dans l'outil d'autoring et mise en place de l'application (dont tablette et objets réels) [LGR⁺ 19a]

L'interface principale de cet outil est présentée à la Figure 1.22, il s'agit d'une application Unity qui tourne sur la tablette. Afin d'illustrer la méthodologie, nous avons pris un cas d'usage de bricolage. La mise en place de l'application, avec la tablette et les objets réels sont présentés dans la Figure 1.22. La liste des relations pré-définies et la liste des objets virtuels tels qu'ils apparaissent dans l'application sont présentées en Fig. 1.23). Pour rendre la création de nouvelles interactions plus facile et plus rapide, une interface C# est fournie pour créer de nouvelles relations. Un éditeur graphique est également intégré à Unity, tant pour les types que pour les relations. Un exemple, pour la relation *RelationPick*, est donné à la Figure 1.24.

Avec ce paradigme, les interactions créées par un développeur sont par nature faciles à réutiliser, et enrichiront les bibliothèques pour l'outil de création. Le code des interactions est générique et pourra être utilisé tel quel (quel que soit l'objet sur lequel l'interaction se fait, par exemple le vissage avec une vis ou un écrou). Enfin, la méthode permet de



FIG. 1.23 – La liste des relations pré-définies (gauche) et objets virtuels (droite) [LGR⁺ 19a]

construire au fur et à mesure des nouvelles interactions qui enrichissent la bibliothèque.

Avec la conception d'interactions et l'outil associé, la création d'expériences de réalité augmentée interactive est facilitée pour les personnes n'ayant pas de connaissances particulières en informatique. Cet outil peut également être utilisé directement par les informaticiens, pour les aider à produire leur application plus rapidement. Les sources de l'application créées peuvent également être récupérées, pour être modifiées en externe par un développeur qui le souhaiterait. Nous permettons ainsi au concepteur de créer une application interactive en réalité augmentée ou virtuelle, sans avoir à écrire une seule ligne de code si l'enrichissement de la bibliothèque du contenu de l'environnement 3D réactif est faite au préalable.

Nous nous sommes intéressés dans un premier temps à l'interaction en réalité augmentée, cependant, notre approche du *définir en faisant* s'applique également à la réalité virtuelle puisque la méthodologie permet de manipuler des objets réels et virtuels, il est donc possible de ne pas voir d'objets réels dans la scène.

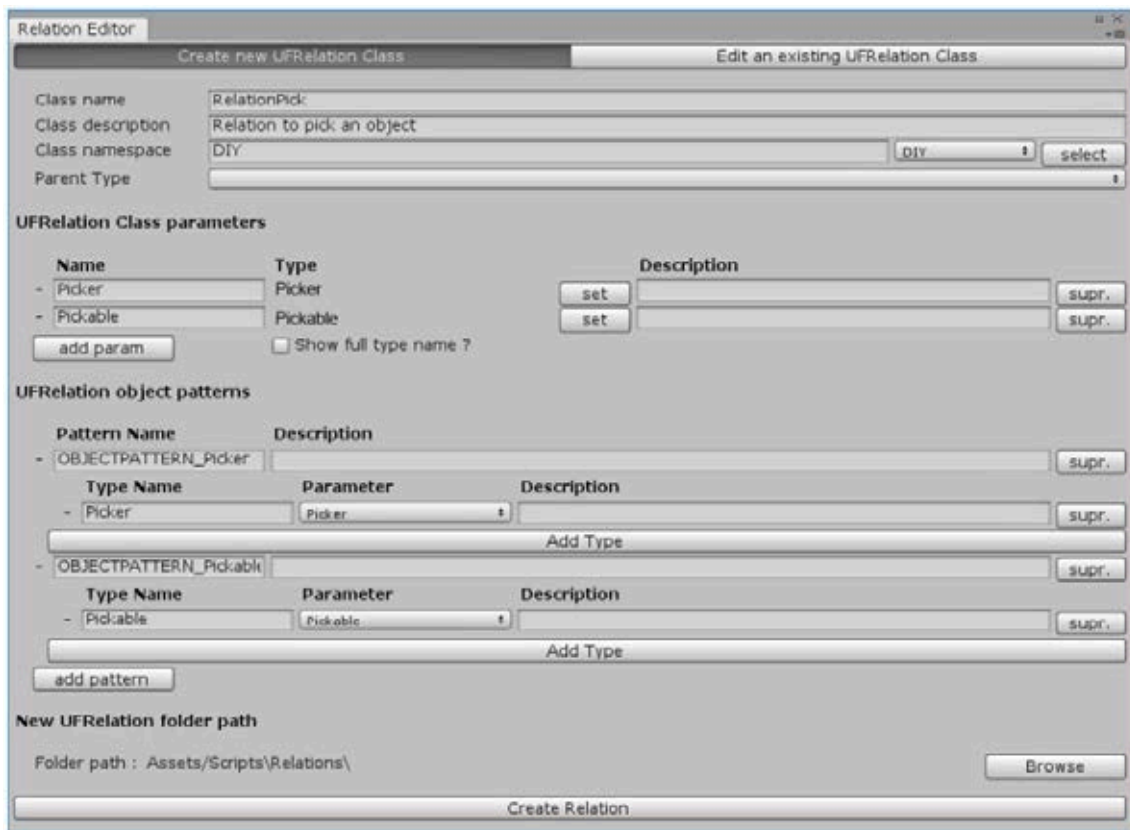
Ces travaux ont été réalisés dans le cadre des projets ANR INTROSPECT A.1 et du labex CominLabs SUNSET A.3.

1.4.3 Extraction de données pour l'environnement 3D réactif

Le développement des bibliothèques de l'environnement 3D réactif est jusqu'à présent fait essentiellement manuellement, ce qui est très coûteux et doit être fait par un informaticien (pour le modèle-objet relation #FIVE). Cependant, des représentations structurées de données existent comme dans le cas du domaine de la construction de bâtiments avec le BIM ou de manière générale avec les ontologies. Ces représentations contiennent des informations qui peuvent être extraites pour alimenter automatiquement les données du modèle objet-relation pour l'environnement 3D réactif.

Building Information Modeling (BIM)

Le BIM est le support de l'information liée au bâtiment. Il définit les échanges d'informations et leur utilisation tout au long de la durée de vie d'un ouvrage, de leur conception jusqu'à leur démolition, en passant par les phases de construction et d'exploitation. La maquette numérique quant à elle est une représentation digitale des caractéristiques physiques et fonctionnelles de cet ouvrage. Les différents corps de métier du domaine utilisent ce format, il permet de faire évoluer les processus de travail et de communication entre les

FIG. 1.24 – L'éditeur de création de nouvelles relations [LGR⁺ 19a]

acteurs d'un projet. Il touche donc par définition à la fois l'environnement 3D et la partie scénarisation (pour les étapes de construction). Pour résumer, le BIM est une méthode de travail basée sur la collaboration autour d'une maquette numérique. L'*Industry Foundation Classes* (IFC) est le format standard d'échange et d'archivage des données techniques de la maquette numérique liée au BIM. Il fournit une définition des objets du bâtiment, de la géométrie, des relations entre les objets et d'autres attributs tels que les couches, les systèmes, le lien avec la planification, la méthode de construction, les matériaux, le domaine (chauffage, ventilation, climatisation, électricité, architecture, structure...) et les quantités. L'*OpenBIM* est un programme de coopération ouvert (initiative des grands éditeurs de logiciels BIM) reposant sur des standards et des processus de travail et destiné au domaine de la conception, de la construction et de l'utilisation de bâtiments.

L'objectif de nos travaux a été d'extraire automatiquement du BIM les informations afin de produire des objets et relations #FIVE pour alimenter l'environnement 3D réactif. Pour ce faire, deux étapes ont été nécessaires.

Nous avons tout d'abord défini un concept de modélisation des informations du bâtiment (basé sur l'Open BIM) et un modèle d'intégration dans l'environnement virtuel (EV) pour fournir un modèle 3D riche en information qui est utilisé pour les applications en augmentant le niveau d'abstraction du processus et donc la productivité des applications [DGA16].

Nous avons ensuite montré comment intégrer le BIM pour assurer l'interopérabilité de l'IFC afin d'utiliser ces informations dans le but de créer un EV 3D réactif basé sur le modèle objet-relation #FIVE, réduisant ainsi les coûts de développement des appli-

cations. L'analyse présentée a permis de définir une méthodologie de modélisation BIM étendant l'interopérabilité IFC à l'environnement de réalité virtuelle interactive [DGA16]. Un exemple de développement d'une application en RV pour la chasse aux risques qui consiste à repérer des erreurs de sécurité sur un bâtiment virtuel en construction est présentée en Section 2.2.2.

Le format des données issues du BIM possède des propriétés intéressantes pour notre modèle de production d'environnement 3D réactif. Cependant, le BIM est spécifique au domaine de la construction de bâtiments. Il existe toutefois des représentations non spécifiques à un domaine qui possèdent des propriétés intéressantes comme les ontologies.

Ontologies

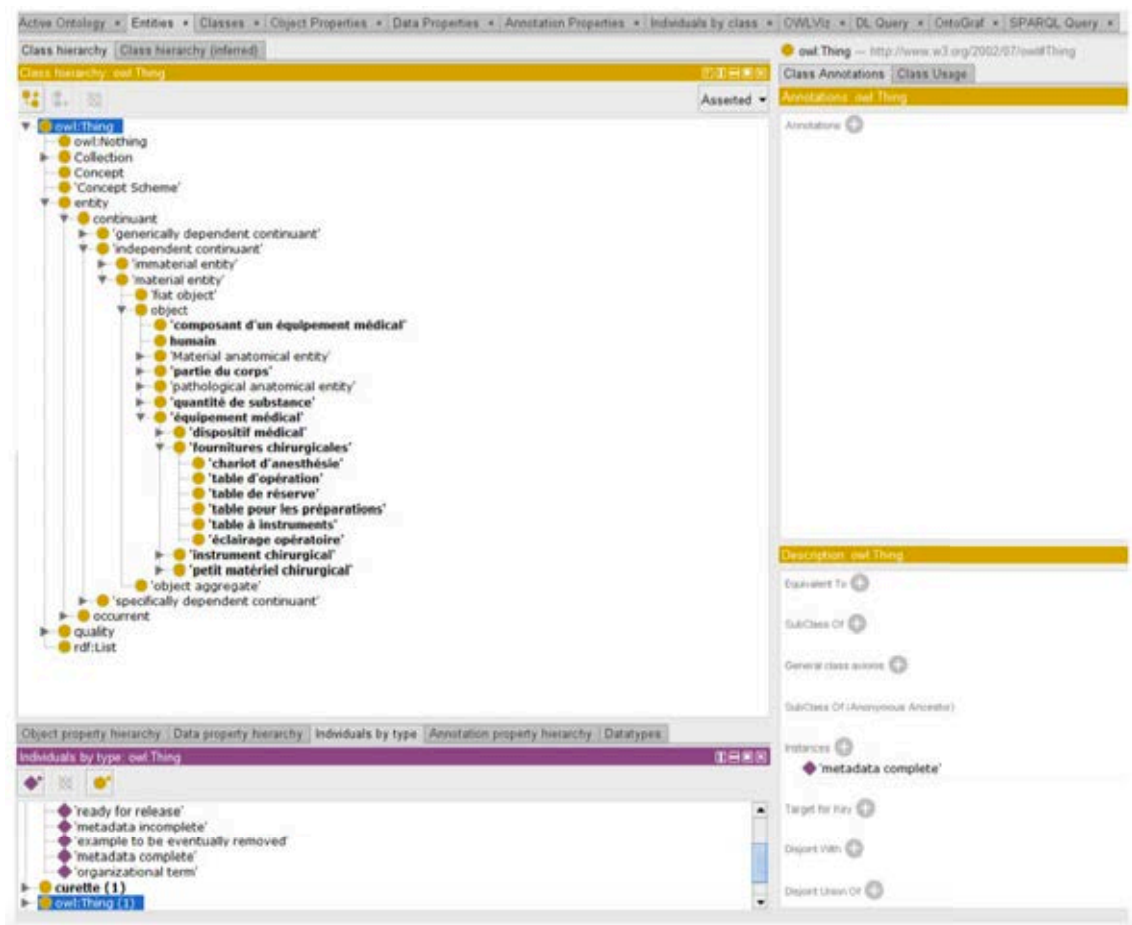


FIG. 1.25 – Extrait de l'ontologie OntoSPM (visualisé avec l'outil Protégé) [GPJ14]

Une ontologie est une représentation formelle et structurée définissant le sens d'un champ d'informations comme par exemple un domaine métier. Elle est composée de concepts du domaine et d'assertions qui définissent le lien entre ces concepts. Les relations plus complexes sont définies par des axiomes. Il existe des langages formels (logique du premier ordre, logique des prédicats), des formats (par exemple OWL) et des outils (par exemple Protégé) pour définir une ontologie. Une ontologie métier rassemble à la fois des informations de l'environnement, sur les objets et leurs liens mais également des informations sur les étapes d'une action. Une ontologie n'est pas construite sur un modèle

objet-relation. Les ontologies sont définies en monde ouvert, c'est à dire que l'exhaustivité n'est pas obligatoire. Toutes les relations existantes ne sont pas forcément définies. Ainsi, une absence de relation d'héritage entre deux classes signifie que la filiation est inconnue (et non absente). A contrario, les modèles objet-relation sont définis en monde fermé. Toute relation entre concepts doit être explicitée (ou possiblement inférée).

Dans le cadre du BIM, nous avons proposé une ontologie permettant l'utilisation des modèles BIM comme générateur d'environnement 3D via le modèle objet-relation en utilisant des ontologies (se basant sur [ifcOWL](#)). Le résultat est non seulement la capacité de créer un lien bidirectionnel entre la base de données 3D informée et l'application de réalité virtuelle, mais aussi de générer automatiquement des fonctions et des capacités spécifiques aux objets en fonction de leur taxonomie. Nous l'avons instancié à l'environnement de formation d'une chasse aux risques [[DLGA18b](#)].

Nous avons également montré comment extraire à partir d'une ontologie d'un domaine particulier un modèle objet-relation [[LM18](#)]. Nous sommes partis d'un exemple d'ontologie dans le domaine de la chirurgie, OntoSPM [[GPJ14](#)] (Figure 1.25). Du fait de la non exhaustivité de la représentation des interactions, Cette extraction a nécessité plusieurs étapes. Nous avons tout d'abord défini une ontologie qui représente le formalisme du modèle objet-relation. Nous créons ensuite le modèle objet-relation du domaine de la chirurgie par synthèse de l'ontologie OntoSPM et de l'ontologie objet-relation (Figure 1.26).

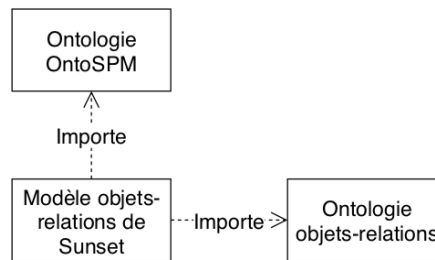


FIG. 1.26 – Structure des ontologies utilisées [[LM18](#)]

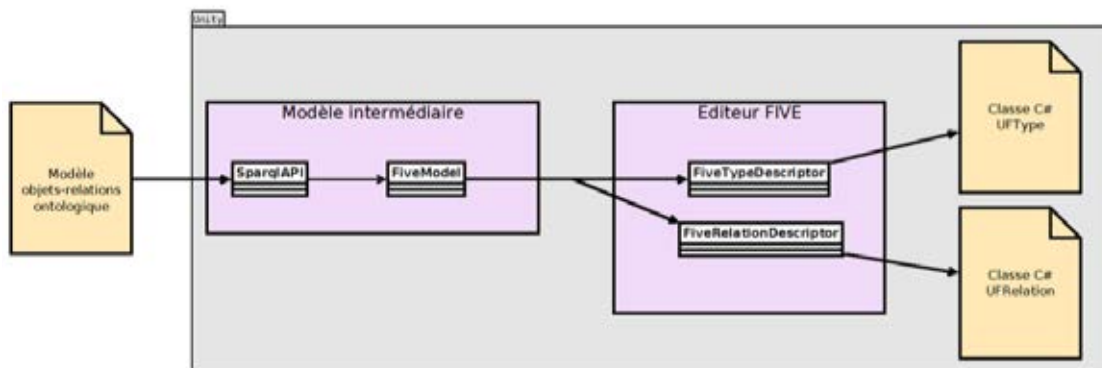


FIG. 1.27 – Processus de génération des objets/reliations #FIVE à partir du modèle objets-relations ontologique [[LM18](#)]

Ces concepts sont alors générés dans du code `#FIVE` sous forme de squelettes que le développeur devra compléter puisque l'ontologie est en mode ouvert contrairement au modèle objet-relation. Plus précisément (Figure 1.27), le modèle objets-relations ontologique est questionné par un langage de requêtes adapté aux ontologies, SPARQL⁵. Un modèle intermédiaire est produit, il représente la structure d'un modèle `#FIVE`. Ce modèle est transformé en code via l'éditeur graphique `#FIVE`.

Malgré la nature différente des ontologies et du modèle objet-relation, il est donc possible d'extraire de l'information des ontologies pour alimenter l'environnement 3D réactif qu'il faudra ensuite compléter. Nous avons montré la démarche sur deux exemples d'ontologie `ifcOWL` et `OntoSPM` [GPJ14], respectivement dans le domaine de la construction de bâtiments et le domaine de la chirurgie.

Ces travaux ont été essentiellement réalisés dans le cadre des projets ANR INTROSPECT A.1, labex CominLabs SUNSET A.3.

1.4.4 Conclusion sur le modèle de l'environnement 3D

Nous nous sommes basés sur un modèle objet-relation pour définir un environnement 3D réactif, le modèle `#FIVE` qui permet de décrire simplement les capacités et propriétés des objets, et les relations entre ces objets. Le modèle intègre un système de requêtes sur les éléments (objets et relations) de l'environnement 3D et qui permet de mettre en évidence dans l'environnement les résultats de ces requêtes. Le framework associé a été conçu pour simplifier les développements, il favorise la ré-utilisation, il possède un haut niveau de généricité liée au domaine d'application et prend en charge la collaboration.

Ce framework n'est pas seulement pertinent pour les développeurs, il est également facilement utilisable par des experts métiers grâce à une interface graphique de développement. Nous avons montré comment définir un environnement 3D réactif grâce à un outil auteur pour la RA qui est généralisable en RV.

Enfin, nous avons utilisé les représentations abstraites et riches comme le BIM ou les ontologies afin d'extraire de l'information métier à injecter dans notre modèle d'environnement 3D réactif.

L'objectif à terme est que le framework `#FIVE` devienne un langage pivot interne de haut niveau pour l'environnement 3D qui vise à faire disparaître le langage informatique pour l'utilisateur, ce qui permettrait son utilisation par des experts métiers, non experts en informatique.

L'environnement 3D permet à l'utilisateur d'interagir et d'effectuer des actions. Ces actions sont la base d'une scénarisation. Toute application de RX nécessite donc une représentation plus ou moins sophistiquée de ces actions. La scénarisation est le dernier composant d'une application de RX que nous souhaitons modéliser.

1.5 Modèle de scénarisation

Dans une application de RX, l'utilisateur effectue des interactions plus ou moins complexes avec l'environnement 3D, dans le cadre d'un scénario constitué d'actions à effectuer ou d'objectifs à atteindre. Même s'il existe dans la littérature différents modèles de formalisation d'un scénario, les scénarisations sont souvent développées directement avec du

5. <https://www.w3.org/TR/rdf-sparql-query/>

code dans un langage informatique général et non spécifique aux scénarios. Nous prenons le parti d'affirmer qu'un langage dédié pour la création de scénarios améliorerait la tâche des développeurs. De plus, nous considérons qu'il serait plus efficace que les experts métiers (non informaticiens) spécifient eux mêmes leurs scénarios afin d'éviter les allers-retours de modification avec le développeur. C'est pourquoi nous avons proposé un modèle de scénario basé sur le séquençement d'actions ainsi qu'un éditeur graphique associé qui répondent à ce cahier des charges (Section 1.5.1).

À l'aide de ce modèle, nous avons étudié la manière de créer des scénarios à partir des données existantes à disposition. Comme dans le cas de l'environnement 3D, il existe des représentations structurées de données telles que les ontologies ou le BIM pour lesquels ces représentation contiennent des informations cette fois-ci liées à une forme de scénarisation qu'il est possible d'extraire pour les injecter dans la définition de scénarios (Section 1.5.2).

Les scénarios peuvent également être construits à l'aide d'autres méthodes. Tout d'abord, nous avons montré que l'observation de procédés réels puis leurs annotations peuvent aboutir à des scénarios utilisables en environnement virtuel. Une autre méthode consiste à se placer directement dans un environnement virtuel. Il suffit alors de demander à un expert métier de réaliser des actions qui seront enregistrées et ré-utilisées par la suite. Enfin, quand un scénario a plusieurs branches qui forment un pattern logique (comme par exemple un montage en croix), il serait intéressant de ne pas avoir à définir toutes ces branches manuellement. Ainsi, nous avons proposé une méthode de généralisation de scénarios qui ne prend en entrée que quelques branches de scénarios et qui rend l'ensemble des branches possibles (Section 1.5.3). Enfin, nous concluons dans la Section 1.5.4.

Ces travaux ont essentiellement été réalisés dans le cadre des projets ANR CORVETTE A.2, labex CominLabs S3PM et SUNSET A.3.

1.5.1 Modèle de scénario basé séquençement d'actions

Il existe dans la littérature plusieurs types de représentation de scénarios : les modèles basés automates [CKP95, Don04], les modèles basés machines à états [MS02, CTB⁺12, PLGP⁺18], les modèles basés *story telling* [PHM⁺03, PCC15], les modèles basés règles et contraintes [JR97, BEL02] et les scénarios orientés objectifs [Lou12].

Ces modèles sont également classifiés sous la forme de scénarios émergeant d'une part et de scénarios prédéfinis d'autre part. La spécification des scénarios émergeant correspond à un ensemble de règles contraignant les interactions. L'utilisateur est laissé libre de ses actions et doit atteindre des objectifs, mais il est alors très difficile de contrôler ce que l'utilisateur doit faire. Les scénarios prédéfinis définissent une suite d'actions à effectuer. Dans ce cas, l'activité de l'utilisateur est fortement contrainte et surtout l'ensemble des cas possibles doivent être prévus dans la spécification du scénario.

Ces deux types de formalisation ont donc des avantages et des inconvénient et leur choix dépend de la manière dont on souhaite les utiliser. Dans le cadre de nos travaux, nous préconisons cependant les scénarios prédéfinis car nous souhaitons garder un fort contrôle sur ce que l'utilisateur fait dans l'environnement 3D. Notons cependant qu'il serait intéressant de pouvoir avoir un peu de souplesse en ajoutant la possibilité de définir des sous objectifs (non complexes) à atteindre.

Nous avons proposé un modèle de scénario basé sur le séquençement temporel d'évènements et d'actions [CGBBA14, CGA15b]. Ce modèle, appelé #SEVEN (*Sensor Effector Based Scenarios Model for Driving Collaborative Virtual Environment*), est fondé sur les réseaux de Petri et possède donc un fort pouvoir d'expression. Afin de prendre en compte les spécificités des applications RX, nous avons enrichi les réseaux de Petri (place, transi-

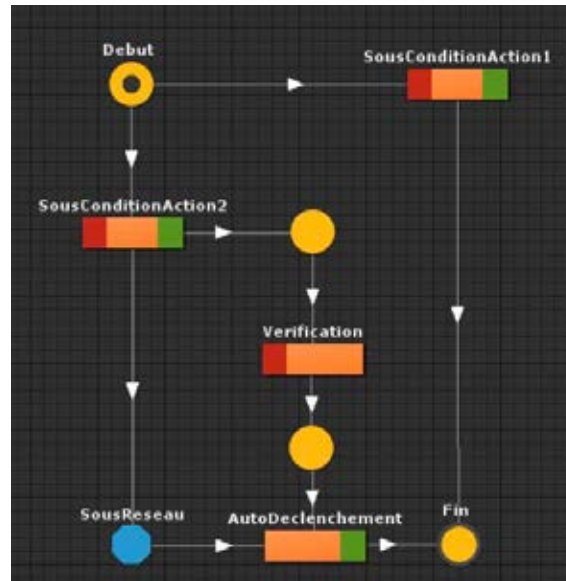


FIG. 1.28 – Un exemple de scénario #SEVEN (les ronds représentent les places, les rectangles définissent les transitions)

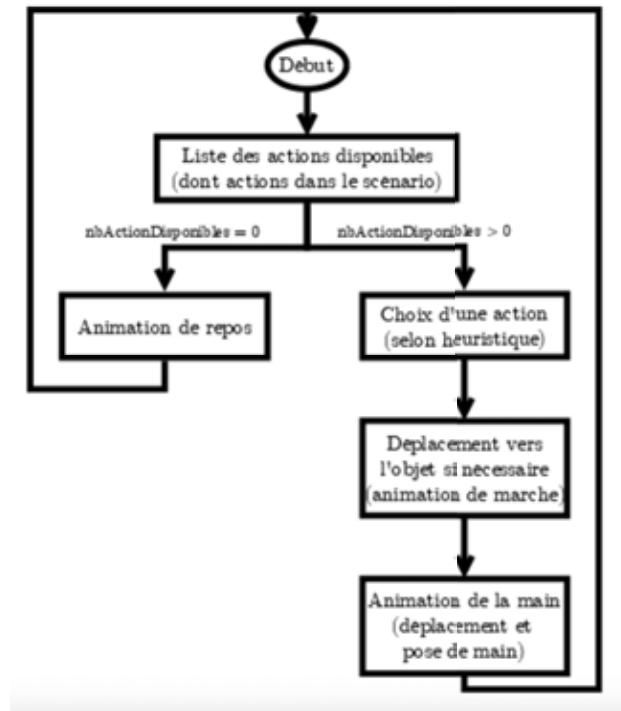
tion) avec trois notions : des capteurs, des effecteurs et le rôle du jeton. Les capteurs sont à l'écoute des événements de l'environnement 3D ou des actions de l'utilisateur. Les effecteurs quant à eux sont les réponses des transitions effectuées et modifient l'environnement 3D en conséquence ou déclenchent une animation dans l'environnement 3D. Un exemple est donné en Figure 1.28 (placés sur les transitions, les capteurs sont en rouge, les effecteurs en vert). Les jetons positionnés sur les places représentent l'état du scénario et les transitions font avancer le scénario lorsque que les conditions décrites par les capteurs sont respectées. Les transitions déclenchent l'effet des effecteurs associés. En cas de choix entre plusieurs transitions, un système de priorité a été ajouté aux transitions pour permettre de prioriser les actions. De plus, le système de jeton à l'origine binaire a également été enrichi avec un contexte et passage de paramètre, ce qui permet d'ajouter de l'information dans le jeton qui transite. Il est aussi possible de définir des sous scénarios externes pour faciliter la réutilisation et obtenir une meilleure lisibilité des scénarios.

Afin de guider l'utilisateur lors du déroulement du scénario, nous avons intégré un système de mise en évidence des interactions par des changements visuels. Ce système se combine avec celui de #FIVE qui permet de mettre en évidence des objets ou des actions et permet de mettre en évidence des actions qui font avancer le scénario. Ce système est paramétrable afin de contrôler le niveau de guidage et le type d'information à mettre en évidence.

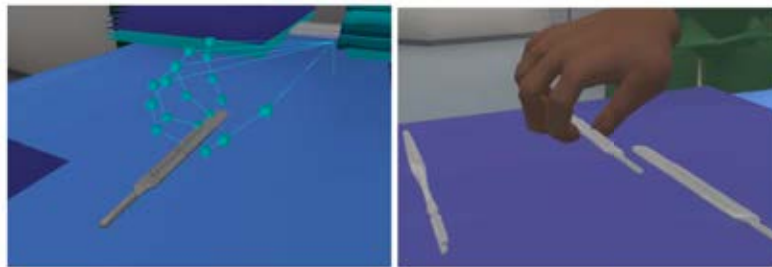
Le modèle #SEVEN fournit un support pour la collaboration avec la définition de rôles dynamiques et gestion de la continuité d'actions (grâce à l'information contenue dans le jeton) [CGA15a] (vidéo⁶).

Dans des applications collaboratives, on ne dispose pas toujours d'un collaborateur réel, il peut être remplacé par un agent virtuel. Pour autant, on ne souhaite pas avoir à programmer l'agent virtuel mais plutôt qu'une automatisation soit faite grâce au scénario. Le modèle permet la collaboration avec des agents virtuels qui peuvent effectuer automatiquement des actions. L'algorithme est le suivant (sur un exemple Fig. 1.29) : l'agent virtuel

6. <https://www.youtube.com/watch?v=HNHID8hN71o>

FIG. 1.29 – *Algorithme de l'agent virtuel [Léc20]*

recherche à chaque mise à jour du scénario quelles sont les prochaines actions à effectuer. Il est possible de le contraindre en ajoutant la notion de rôle ; la liste des actions nécessite qu'une vérification soit faite pour garder la cohérence de l'état du monde ; l'agent peut alors choisir une des actions (soit de manière aléatoire soit selon les priorités des actions instaurées dans le scénario) ; le scénario est mis à jour.

FIG. 1.30 – *Un exemple de descripteur de pose de main : scalpel, main droite*

L'agent virtuel est modélisé par un humain virtuel et est doté de capacités de mouvements pour chaque interaction et animé par de la cinématique inverse. L'agent se déplace automatiquement et adaptera sa pose de main selon l'objet. Pour ce dernier point, nous avons développé des descripteurs de pose de main sur chaque objet qui définissent comment l'objet doit être pris et avec quelle(s) main(s) (Figure 1.30).

#SEVEN permet la programmation d'un scénario avec un outil auteur dédié et intégré à Unity pour faciliter la conception des scénarios (Fig. 1.31). Cet éditeur permet aussi de faire du monitoring des actions de l'utilisateur en cours d'exécution (en faisant apparaître visuellement la transition des jetons dans le scénario).

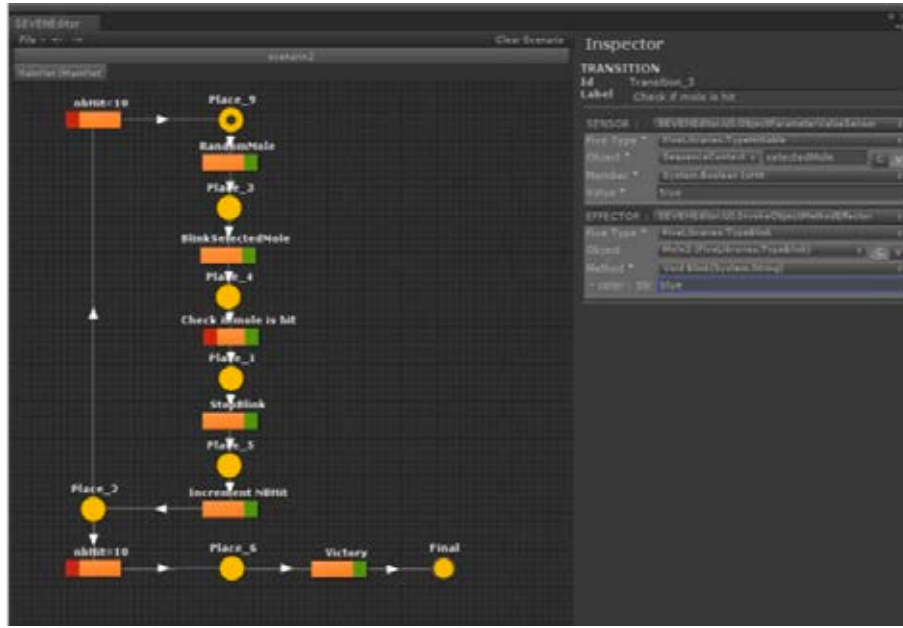


FIG. 1.31 – L'interface de l'éditeur #SEVEN

Ce formalisme ayant un pouvoir d'expression important, il est également possible de concevoir un scénario de type émergent en définissant un objectif (en définissant l'état de l'environnement final) à atteindre, ce qui permet de laisser l'utilisateur libre de ses actions. Cet objectif à atteindre est cependant qualifié de simple par rapport aux formalismes spécifiques qui sont dédiés aux scénarios émergents.

On peut donc qualifier notre modèle d'hybride car il est possible d'utiliser dans un même scénario les deux manières de faire, par état ou par action (de type émergent ou prédéfini).

1.5.2 Extraction de données pour le scénario

De la même manière que pour l'environnement 3D réactif, il est possible de s'appuyer sur les données structurées telles que les ontologies ou le BIM pour extraire des informations et renseigner le scénario.

Le BIM, s'il est bien renseigné, rassemble toutes les informations concernant la construction d'un bâtiment et le déroulement sur le chantier des rotations ainsi que le placement des équipements. Le BIM contient donc les données sur l'enchaînement des étapes de la construction d'un bâtiment afin d'organiser le déroulement d'un chantier et l'intervention des différents corps de métier [DLGA18b]. Il est possible d'utiliser ces données pour concevoir un squelette de scénario avec le modèle #SEVEN qui servira de base pour une application de construction. La difficulté repose sur le fait que même si le format IFC permet de rassembler les informations nécessaires, il faut qu'il soit alimenté et complété pour que nous puissions obtenir l'information nécessaire à la spécification d'un scénario complet.

Dans le même esprit, selon la richesse des données de l'ontologie, il est possible d'extraire des informations basées scénarios. L'ontologie du domaine des opérations chirurgicales ONTOSPM [GPJ14] contient d'une part les étapes d'une opération chirurgicale et d'autre part des contraintes sur l'enchaînement de certaines actions. Il est donc possible

d'extraire de cette ontologie un squelette de scénario #SEVEN qu'il faudra compléter par la suite [LM18]. Comme indiqué lors de la discussion de l'environnement 3D réactif, les ontologies sont définies en monde ouvert alors que nous avons pris le parti du contrôle avec un monde fermé. Il est donc illusoire d'avoir une extraction complète des données entre ces deux mondes. Tout comme pour l'environnement 3D réactif, il faudra donc compléter les données manuellement ou en utilisant d'autres méthodes présentées dans la section suivante.

1.5.3 Méthodes de création du scénario

Dans le cas où il n'existe pas de représentation structurée des séquencements des actions, nous avons étudié la manière dont un scénario peut être construit.

Tout d'abord, l'observation d'une procédure réelle peut servir de base dans la construction d'un scénario. Une autre méthode est d'enregistrer un scénario directement dans un environnement virtuel par un expert métier. Enfin, dans le cas de scénarios complexes pour lesquels on ne souhaite pas prévoir tous les cas possibles, nous avons utilisé une généralisation automatique de scénarios à partir de quelques instances de scénarios d'entrée.

Création de scénario à partir d'observations réelles

Ce travail résulte d'une collaboration avec l'équipe MediCIS du LTSI (Laboratoire Traitement du Signal et de l'Image) et le CHU de Rennes. Nous avons étudié la génération de scénarios #SEVEN à partir d'observations dans le domaine de la chirurgie en utilisant le modèle objet-relation #FIVE [CGC⁺16a, CGC⁺16b, LM18].

Les actions de l'opération chirurgicales sont tout d'abord annotées via l'ontologie ONTOSPM [GPJ14] avec le logiciel du LTSI SurgeTrack. Elles peuvent également être filmées et les vidéos sont annotées par la suite (partie LTSI).

Nous générons alors le scénario #SEVEN à partir de ces annotations. SurgeTrack permet de créer des objets, au sens du modèle objet-relation et de leur associer des actions, des réalisations de relations. Nous utilisons le modèle objet-relation #FIVE afin de définir les annotations utilisées dans SurgeTrack.

La spécification du scénario #SEVEN obtenu est un fichier XML qui est intégré à Unity. Il est alors opérationnel pour fonctionner avec #FIVE. Il doit cependant être complété par le développeur pour ajouter l'animation des acteurs, le développement des interactions et les métaphores. Certains éléments peuvent être récupérés dans des bibliothèques (services RV).

La partie d'annotations via le logiciel SurgeTrack a été jugée très fastidieuse et doit être réalisée par un expert métier. Même si la génération du scénario #SEVEN à partir de SurgeTrack est assez simple, cette méthode de création de scénario par observation réelle doit être utilisée en toute connaissance de cause.

Création de scénario en RV

Afin d'éviter l'étape d'annotations de la méthode précédente, nous avons proposé que la production de séquencements d'actions soit effectuée directement en RV par un utilisateur qui peut être un expert métier [LGR⁺19b] (vidéo⁷). L'environnement 3D réactif est tout d'abord créé par le développeur en utilisant #FIVE, ainsi les objets et les relations sont disponibles. Le scénario est ensuite construit, par exemple, par un expert métier dans

7. <https://www.youtube.com/watch?v=b6RzgFwY00Ut=59s>

l'environnement virtuel sans avoir à écrire une seule ligne de code, grâce au principe du *construire en faisant*. Ainsi, le concepteur d'applications à partir d'un environnement virtuel enrichi d'objets et d'interactions, crée à l'aide d'une interaction en RV un scénario par l'exécution d'une simulation dans laquelle chaque action ajoute une étape dans le scénario et ainsi de suite (Figure 1.32).

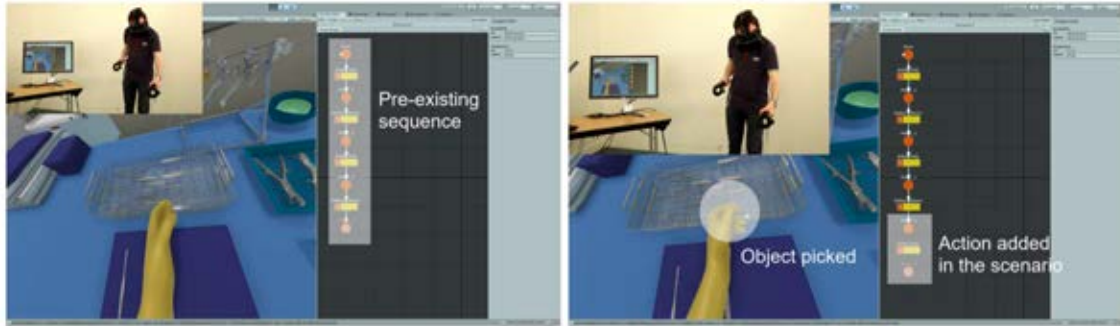


FIG. 1.32 – L'exécution d'une action par l'expert métier en RV ajoute une action dans le scénario #SEVEN (exemple : prise d'un scalpel)

Le scénario obtenu à cette étape est linéaire. Si le scénario est plus complexe, il est possible d'ajouter en RV des branches à ce scénario à l'aide de fonctions fournies via l'éditeur graphique de scénario. Ainsi l'utilisateur peut compléter le scénario en RV au fur et à mesure en ajoutant des branches jusqu'à ce qu'il soit satisfait du scénario obtenu. Le scénario résultat peut ensuite être utilisé dans l'environnement virtuel [LGR⁺20] et l'utilisateur peut alors être immergé dans l'environnement avec des tâches données à accomplir. De plus, le scénario peut s'exécuter automatiquement par un agent virtuel, ce qui est très utile pour démontrer comment la séquence d'actions est censée être pour le montrer à un utilisateur (par exemple un apprenant) ou pour simplement le tester (Fig. 1.33).

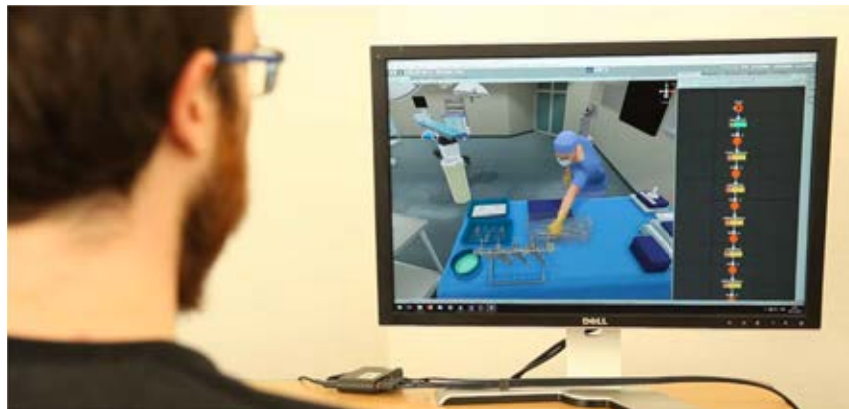


FIG. 1.33 – Exécution automatique du scénario par un agent virtuel

L'intérêt de l'approche est multiple, elle permet à l'expert métier de créer son propre scénario. L'expert peut également observer visuellement l'avancée d'un utilisateur via la progressions des jetons dans le scénario #SEVEN en plus de le voir effectuer les actions en RV. L'approche permet à l'utilisateur d'apprendre en faisant lui même les actions dans l'environnement virtuel ou bien en observant un agent virtuel effectuer les actions à sa

place.

Généralisation de scénario à partir de plusieurs scénarios

Dans le cas de variabilité importante dans une procédure, il est difficile voire dans certains cas inenvisageable de générer à la main tous les scénarios possibles. Nous pouvons citer un exemple très simple : le montage en croix de quatre vis (par exemple le montage de roue sur un véhicule). On commence par l'une d'elles, puis la deuxième à visser sera celle en diagonale. Ensuite, on choisit l'une des deux restantes et on termine par la dernière. Il y a huit possibilités de vissage. Le fait d'obtenir ces huit scénarios à partir d'un sous-ensemble de scénarios s'appelle la généralisation ou la synthèse. Nous avons effectué ces travaux en collaboration avec l'équipe [Hycomes](#) de l'IRISA-Inria Rennes. Deux méthodes de généralisation de scénarios ont été proposées. Elles sont basées sur les deux sections précédentes (l'une à partir d'observations réelles et l'autre avec le construire en faisant).

Nous avons étudié comment générer des modèles de processus chirurgicaux généralisés et comment les utiliser comme spécification de scénarios pour des environnements virtuels collaboratifs à partir d'observations réelles [CGC⁺16a, CGC⁺16b]. Une théorie d'algorithme basée sur les régions est utilisée pour dériver un modèle de processus chirurgical généralisé (gSPM), basé sur les Tests and Flips [Sch06, Cai13], à partir d'observations de cas réels. Nous avons ensuite intégré ce gSPM comme spécification de tous les scénarios possibles dans un environnement virtuel collaboratif en utilisant le modèle de scénarios #SEVEN et le cadre d'environnement 3D réactif #FIVE.

La généralisation obtenue, même si elle est correcte mathématiquement, doit être soumise à l'expert métier puisque des branches de scénarios sont construites sans avoir été observées. Il faut donc vérifier qu'elles ont un sens dans le domaine et qu'elles ne sont pas dangereuses (par exemple pour une application en chirurgie).

Là encore, l'inconvénient de cette méthode est que les annotations des observations réelles sont très coûteuses en temps et doivent être faites par un expert métier. De plus, afin de gagner en temps de développement, nous avons remarqué que la partie généralisation devrait être restreinte le plus possible à la partie du scénario qui contient de la variabilité.

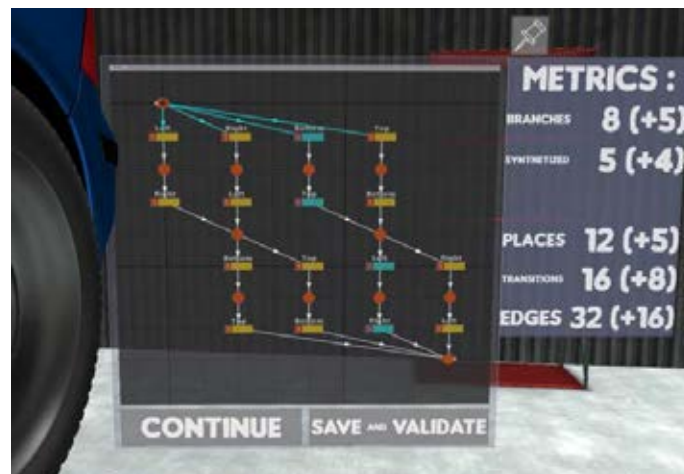


FIG. 1.34 – La visualisation graphique avec les métriques visuelles (nombre total de variations, ainsi que le nombre de nouvelles variations)

Pour pallier à certaines de ces limitations, nous avons proposé une méthode pour la création de scénarios en RV, basée sur l'enregistrement des actions d'un expert en RV, la fusion et la généralisation des séquences enregistrées [LGL⁺20]. Pour faciliter la création du scénario avec cette méthode, une approche itérative est proposée. Avec cette approche, l'expert peut d'abord enregistrer une séquence d'actions en RV, déclencher la méthode mathématique précédente pour fusionner et généraliser les séquences afin de créer un scénario #SEVEN. Ce scénario est ensuite intégré automatiquement dans l'environnement virtuel utilisant #FIVE, afin de permettre à l'expert d'itérer les deux premières étapes avec des indications visuelles montrant ce qui est déjà géré par le scénario (Fig. 1.34). Pour l'exemple de montage en croix, au moins trois instanciations de scénarios sont nécessaires pour obtenir les huit possibilités.

Nous avons évalué cette méthode itérative de création de scénario sur l'exemple de vissage en croix auprès de 30 participants. Nous avons fait trois groupes : 7 experts de #SEVEN, 14 développeurs et 9 novices en développement mais experts métier. Les participants ont trouvé l'outil utile, agréable et simple à utiliser. Les meilleurs résultats proviennent des utilisateurs experts en scénario et des experts métier, tandis que les développeurs tendent à donner de moins bons scores à l'outil, en particulier en ce qui concerne le souhait de réutiliser l'outil. Certains commentaires des développeurs montrent que malgré l'utilité perçue de l'outil, ils estiment qu'il serait plus facile et rapide pour eux de coder directement le scénario (le codage est leur métier). Cela vient probablement du fait que le scénario proposé est relativement simple, alors que le problème vient souvent de la difficulté pour les experts métiers à communiquer le scénario aux développeurs.

Grâce à cette nouvelle méthodologie, les experts sont en mesure de concevoir facilement des scénarios pour les applications de RV. En fait, l'enregistrement les aide à exprimer leurs connaissances implicites en exécutant les actions au lieu de devoir les expliquer, et la génération de nouvelles séquences à partir des observations les aide à gérer facilement la variabilité des procédures de scénarisation.

Cette méthode est un outil important pour faciliter la communication entre les experts du domaine et les développeurs, qui ont souvent des difficultés à construire des applications de RV qui nécessitent à la fois les connaissances de l'expert et un certain degré de variabilité pour obtenir un scénario réellement pertinent.

1.5.4 Conclusion sur le modèle de scénarisation

Nous avons proposé un modèle de scénarisation #SEVEN basé sur des réseaux de Petri. Ce modèle consiste à définir une spécification de scénario sous la forme de séquencements d'actions que l'utilisateur doit effectuer. Il permet aussi de définir des objectifs simples (plutôt que des séquencements d'actions) afin de laisser plus de liberté d'action à l'utilisateur et de définir des sous étapes sous la forme d'états à atteindre. De plus, notre moteur est intégré à Unity avec un outil auteur de définition de scénarios qui facilite grandement leur conception.

Nous avons montré que la conception du scénario peut être facilitée par l'extraction de données par essence structurées et riches d'information comme le BIM ou les ontologies.

Dans le cas où il n'existe pas de données existantes, nous avons défini plusieurs méthodes de création de scénarios. La première est basée sur la transformations d'annotations d'observations réelles en scénario #SEVEN. Cette méthode ne passe pas à l'échelle pour des scénarios complexes car le temps d'annotation est trop important. La seconde permet à l'utilisateur comme un expert métier de créer son scénario directement dans l'environnement virtuel en RV, une fois que l'environnement 3D réactif est défini. Pour des parties de

scénarios à grande variabilité, nous avons proposé une troisième méthode de création de scénarios qui prend en entrée plusieurs scénarios (obtenus par annotations ou directement en RV) et qui rend une fusion de tous les scénarios d'entrée avec l'ajout de nouveaux scénarios obtenus par généralisation mathématique.

L'objectif à terme est que le framework #SEVEN devienne un langage pivot interne de haut niveau pour la spécification des scénarios qui vise à faire disparaître le langage informatique pour l'utilisateur, ce qui tend à son utilisation pour des experts métiers, non experts en informatique.

1.6 Conclusion sur les abstractions en RX

Nous avons présenté des modèles et solutions pour augmenter la performance des applications de RV en prenant en compte l'architecture matérielle. En particulier, nous avons proposé des solutions logicielles afin de porter les applications sur une grappe de PC. Nous avons montré dans le cadre de la détection de collision comment adapter les méthodes et algorithmes selon l'architecture cible afin de gagner en performance.

Nous nous sommes ensuite concentrés sur l'application de RX et sur la manière dont elle pouvait être structurée par composant. Nous avons défini dans le cadre de la collaboration distante différents modèles qui améliorent la manière de collaborer. Nous avons modélisé le collaborateur sans préjuger de sa nature réelle ou virtuelle pour pouvoir échanger son avatar dynamiquement. Nous avons proposé un modèle l'environnement 3D réactif enrichi sémantiquement et un modèle de scénario hybrid basé sur le séquençement des actions. Nous avons montré comment alimenter semi-automatiquement ces deux modèles par des représentations haut niveau comme les ontologies ou le BIM, ou par annotations directes dans l'environnement, voire par généralisation itérative par synthèse.

Notre méthodologie sera particulièrement performante dans le cas de familles d'applications pour lesquelles il existe de la variabilité et des modifications, et un cycle de production qui peut être itératif.

L'objectif à terme est que #FIVE et #SEVEN deviennent des langages pivot interne de haut niveau pour l'environnement 3D et la scénarisation. Ce qui permettra à des experts métiers, non experts en informatique de concevoir des applications de RX.

Une autre perspective serait de concevoir un modèle qui permettrait de s'adapter à l'utilisateur selon sa facilité d'actions ou dans le cas d'application de formation, selon ce que le formateur préconise. Ce modèle pourra intégrer différents modèles pédagogiques existants et choisir quel modèle intégrer dynamiquement pour s'adapter à la situation.

Chapitre 2

Vers des applications et outils

Les domaines applicatifs de la RX sont nombreux et variés avec des spécificités liées au domaine et à la manière dont les utilisateurs finaux souhaitent utiliser les applications développées. Nous avons pu aborder des domaines très variés. Nous présentons dans ce chapitre un sous échantillon des domaines étudiés avec le domaine de la santé (Section 2.1), le domaine du bâtiment (Section 2.2) et les arts numériques (Section 2.3). Nous avons particulièrement étudié le patrimoine culturel que nous présentons dans le Chapitre 3. Nous avons également proposé des applications de RX sur le son [GASG⁺14], la simulation d'humains virtuels [GLF⁺21], l'Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM) [LMASLG16, LMBGA18] ou encore l'IoT [BGL⁺20a, BGL⁺20b]. Afin de faciliter le développement des applications, nous avons proposé des outils qui sont présentés en Section 2.4.

2.1 Domaine de la santé

Le domaine de la santé est vaste et l'utilisation de la RX est plus ou moins développée dans ce secteur d'activités. Nous avons eu l'occasion d'étudier une partie de ce domaine avec la chirurgie (Section 2.1.1) et la rééducation (Section 2.1.2).

2.1.1 Chirurgie

La simulation en RX s'est développée dans le domaine de la chirurgie avec l'apport notable pour la formation chirurgicale. L'objectif est d'améliorer la qualité et la sécurité des soins par la formation des soignants tout en respectant le principe éthique *jamais la première fois sur un patient* [GM12]. Cependant, la plupart des simulateurs de RV se concentrent sur l'apprentissage des compétences techniques (comme par exemple les compétences motrices, la dextérité, les connaissances), [RHB20] peu d'entre eux traitent des compétences procédurales (des connaissances qui incluent des étapes, qui peuvent être ordonnées dans une séquence temporelle) ou les compétences non techniques (comme par exemple la conscience de la situation ou la gestion du stress).

Partant de ce constat, en partenariat avec l'équipe MediCIS du LTSI (Laboratoire Traitement du Signal et de l'Image), l'équipe Hycomes de l'IRISA-Inria Rennes, le LP3C (Laboratoire de Psychologie: Cognition, Comportement, Communication, Université de Rennes 2) et le service de neurochirurgie du CHU de Rennes (dans le cadre des projets labex CominLabs S3PM (vidéo¹), SUNSET A.3 et SUNSET International A.1), nous avons conçu et développé une méthodologie originale de création d'applications de RV dans le domaine de la neurochirurgie, qui proposent des environnements de formation

1. <https://www.youtube.com/watch?v=qImpThoJiK0>



FIG. 2.1 – *Table d'instrumentation réelle (à gauche) et virtuelle (à droite)*

pour l'apprentissage de procédures et la gestion des situations particulières, et intègrent une évaluation des compétences visées. Nous avons utilisé les moteurs d'environnement 3D #FIVE et de scénarisation #SEVEN pour toutes ces applications.

Les études qui ont évalué les simulateurs de RV se sont concentrées sur la faisabilité, la fiabilité ou la facilité d'utilisation [RHB20]. Peu d'entre elles ont utilisé un outil spécifique de mesure de l'acceptabilité alors que cela correspond à la première étape de l'étude d'un simulateur pour vérifier sa possible utilisation sur de futurs usagers.

Nous avons étudié l'acceptabilité et la facilité d'utilisation d'un nouveau simulateur de RV pour la formation aux compétences procédurales chez les infirmières et les infirmiers de bloc opératoires (IBODE : Infirmier de Bloc Opératoire Diplômé d'État) [BMA⁺19], en se basant sur le modèle de la théorie unifiée de l'acceptation et de l'utilisation de la technologie (UTAUT [VTX12]).

Le scénario a été conçu pour former les IBODE à la préparation de la table d'instrumentation (Fig. 2.1) pour une craniotomie dans la salle d'opération. Cette préparation nécessite un séquençement d'actions dans un environnement 3D. Le moteur de #FIVE a été utile pour décrire l'environnement 3D avec les nombreux objets et les relations possibles entre eux. Le moteur #SEVEN a été utilisé pour deux raisons. La première raison concerne la définition du scénario car il contient plusieurs branches. La seconde raison est liée au fait qu'un collaborateur virtuel est utilisé dans le séquençement des actions, ce collaborateur peut ainsi choisir et effectuer automatiquement les actions à disposition dans le scénario.

Le système de formation par simulateur de RV (casque) a été testé auprès d'un échantillon de 16 utilisateurs non experts et de 13 experts (IBODE) du service de neuro-chirurgie du CHU de Rennes.

Les résultats obtenus ont démontré l'acceptabilité du simulateur de RV sans différence significative entre les non experts et les infirmiers experts, ainsi qu'une absence d'effet sur l'âge, ou le genre. Nous avons également demandé aux participants d'évaluer la charge de travail, le sentiment de présence et l'éventuel malaise dû au simulateur.

Les participants ont très bien évalué le simulateur pour le sentiment de présence et la *cybersickness*. La charge mentale a été évaluée comme modérée. La plupart des participants ont souligné son intérêt pédagogique, son caractère ludique et son réalisme, mais certains d'entre eux ont également regretté son manque de confort visuel (sans doute dû au champ de vision réduit sous casque de RV). Les résultats confirment que ce simulateur de RV conçu pour enseigner les procédures chirurgicales peut être utilisé comme outil dans la formation initiale ou professionnelle. Le simulateur est actuellement utilisé dans un cursus de formation des infirmières et infirmiers à l'école de Rennes.

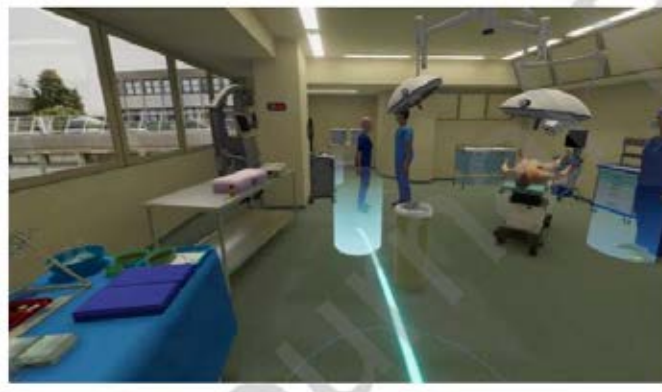


FIG. 2.2 – *Environnement virtuel du bloc des erreurs* [BMLD⁺21]

La simulation en RV s'est avérée être un outil de formation utile pour les compétences techniques, elle a été moins étudiée pour les compétences non techniques (cognitives, sociales ou interpersonnelles).

Nous avons réalisé une expérimentation étudiant la charge de travail perçue, l'anxiété et la conscience de la situation des participants immergés dans un scénario de simulation chirurgicale virtuelle, plus précisément de reconnaissance d'erreurs dans un bloc opératoire virtuel (sous casque) [BLDM⁺19, BMLD⁺21].

Dix-huit étudiants infirmiers et huit infirmiers experts ont participé à l'expérience. Ils ont été immergés dans une salle d'opération virtuelle et ont signalé toutes les erreurs qu'ils ont observées.

Dans le cadre de cette application, l'interaction avec l'environnement 3D et le scénario sont très simples. Pour autant, nous avons utilisé #FIVE et #SEVEN pour leurs propriétés d'efficacité. Nous avons utilisé #FIVE pour enrichir l'environnement 3D par la sémantique des objets et des relations. Cela a permis d'ajouter facilement des erreurs dans la scène. Dans cette application le séquençage d'action est linéaire et #SEVEN a été utilisé pour faciliter l'écriture du scénario pour inclure des relations (comme par exemple indiquer à l'utilisateur de signaler une erreur et de vérifier qu'il l'a fait).

Nous avons défini dix-neuf erreurs avec différents degrés de gravité. Les mesures ont été extraites des *logs* (nombre d'erreurs, temps de détection, parcours dans la scène) et de questionnaires (conscience de la situation, charge de travail subjective, anxiété et expérience de l'utilisateur).

Les résultats ont montré que les participants qui ont détecté le plus d'erreurs avaient un niveau plus élevé de conscience de la situation, détectaient plus rapidement les erreurs à haut risque et se sentaient plus immergés dans la salle d'opération virtuelle que ceux qui ont détecté moins d'erreurs. Ils ont également estimé que la charge de travail était plus légère et ont éprouvé plus de satisfaction. Les étudiants ont exploré la salle d'opération plus que les experts et ont détecté davantage d'erreurs, notamment celles présentant un risque modéré.

La technologie VR utilisée pour le simulateur a été généralement bien acceptée et a motivé les stagiaires. De plus, elle fournit des données qui peuvent être utilisées de manière constructive lors du *débriefing*. Le simulateur est actuellement utilisé dans un cursus de formation des infirmières et infirmiers à l'école de Rennes.

La communication est très importante dans une équipe et particulièrement dans le cadre d'un bloc opératoire. Des cours sont donc développés pour former à la communication ouverte.



FIG. 2.3 – *Environnement virtuel du bloc sur tablette tactile [BMD⁺21]*



FIG. 2.4 – *Exemple de comportement problématique [BMD⁺21]*

Nous avons analysé le comportement de prise de parole d'étudiants infirmiers de bloc dans différentes situations et avec des personnes de statuts professionnels différents (i.e. infirmier de bloc et chirurgien) [BMD⁺21]. Nous avons utilisé une simulation numérique interactive sur tablette (Fig. 2.3) avec des vignettes indiquant des comportements problématiques d'un collègue (Fig. 2.4). Il a été demandé aux infirmières (N = 33 femmes) si elles signaleraient l'erreur, si elles seraient gênées et comment elles le feraient.

Les résultats montrent que les participantes s'expriment en fonction de leur évaluation de la situation (nature et niveau de risque), et pas seulement en fonction du statut de la personne à qui ils s'adressent. Cependant, elles ont exprimé une plus grande gêne à s'adresser à une personne ayant un statut plus élevé. Ceci est confirmé par leurs formulations et stratégies lorsqu'elles s'adressent au chirurgien.

Les résultats montrent également une bonne acceptabilité de ce scénario de simulation avec une interaction faible sur une simple tablette, ce qui encourage le développement de ce type de simulation non immersive en soins infirmiers et dans d'autres spécialités pour une massification rapide.

2.1.2 Rééducation

La rééducation est un vaste domaine pour lequel la RX peut offrir des alternatives ou complémentarités intéressantes. Nous étudions le cas de personnes en situation de handicap pour lesquelles une mobilité avec un fauteuil roulant électrique serait une amélioration de leur qualité de vie et nous avons proposé un simulateur de fauteuil en RV doté d'une plateforme mécanique. Dans un autre registre, nous utilisons la RV pour les personnes sortant de réanimation suite par exemple à une infection au Covid-19 pour leur permettre de remarcher plus rapidement. Enfin, nous étudions la manière dont la RX pourrait améliorer la reprise d'activité professionnelle de patientes suite aux traitements utilisés pour le cancer du sein.

Simulateur de fauteuil roulant électrique

Seulement 20% des personnes en situation de handicap ayant besoin de fauteuil roulant électrique ont l'accord d'un professionnel de santé pour les conduire. En effet la conduite est complexe et peut s'avérer dangereuse pour l'utilisateur et l'écosystème environnant.

Les réalisations d'études scientifiques avec des utilisateurs réguliers de fauteuils roulants électriques dans un environnement réel écologique est complexe, coûteux, dangereux voire presque impossible pour des raisons d'éthique.

Les équipes de robotique et de mécanique de l'INSA Rennes et des équipes de rééducation du Pôle Saint-Hélier se sont intéressés à la conception, validation, évaluation et formation à des fauteuils roulants électriques équipés de dispositifs d'aide à la navigation [BPF⁺15].



FIG. 2.5 – Une patiente dans le simulateur, plate forme immersive Immersia [VGD⁺19]

Notre démarche a été de concevoir un simulateur (avec retours visuel, sonore et haptique par une plateforme mobile) de fauteuil roulant électrique utilisant la réalité virtuelle (Fig. 2.5 et Fig. 2.6) [VGD⁺19] afin de reproduire et d'enregistrer un comportement fidèle

(par rapport à la réalité) de navigation en fauteuil roulant électrique dans un environnement virtuel écologique et sûr (vidéo²).

Nous avons conçu ce simulateur de fauteuil roulant électrique de haute fidélité en réalité virtuelle en partenariat avec les équipes de robotique et de mécanique de l'INSA Rennes, ainsi que l'équipe de rééducation du Pôle Saint-Hélier de Rennes dans le cadre du projet INTERREG ADAPT A.1.

Un tel simulateur virtuel peut remplir plusieurs objectifs. En premier lieu, il peut servir pour la formation, la rééducation ou bien la sensibilisation des patients afin d'améliorer la navigation avec ce type de fauteuil. De plus, il peut également servir à tester et valider les algorithmes utilisés par le module d'aide à la navigation.

Nous avons porté une attention particulière sur les retours visuels, haptiques et vestibulaires fournis par le simulateur qui imitent les accélérations, les décélérations, les vibrations et les forces mécaniques réelles du fauteuil roulant électrique et les forces mécaniques ressenties pendant la navigation afin de proposer une simulation avec des retours sensorimoteurs les plus fidèles possibles [VGD⁺20b] [VGD⁺20a].



FIG. 2.6 – Un utilisateur sous simulateur avec casque de RV [VGD⁺20b]

De cette façon, les décalages cognitifs entre ce que l'utilisateur voit et ressent sont minimisés, ce qui permet de réduire le mal des simulateurs et de proposer à l'utilisateur une expérience fidèle à la réalité, ce qui renforce le sentiment de présence. Ainsi, cette haute qualité du simulateur permet à la fois de garantir une formation efficace et de fournir un environnement de prototypage d'algorithmes [VDP⁺21].

Afin d'évaluer la validité du simulateur, nous avons mis en place une expérimentation avec des patients en situation de handicap consistant à réaliser une tâche validée cliniquement, avec notre simulateur RV de fauteuil roulant et un fauteuil roulant électrique standard sur une tâche réelle. La tâche consistait à effectuer plusieurs circuits de difficulté de navigation croissante comprenant les éléments de la vie courante qui posent des problèmes de navigation en fauteuil comme les pentes, un ascenseur, des couloirs étroits

2. <https://www.youtube.com/watch?v=H-FfTKxkhvUt=22s>

ou des obstacles dynamiques. Dans le cadre du parcours réel, les obstacles sont en carton pour éviter tout risque pour les patients.

L’interactivité étant de la navigation, l’environnement 3D réactif n’a pas nécessité l’utilisation de #FIVE. Nous avons utilisé le moteur de scénarisation #SEVEN pour piloter les changements de circuits virtuels et l’apparition des obstacles dynamiques.

L’objectif de cette étude était de comparer la performance de l’utilisateur en terme de temps de parcours entre les conditions réelles et virtuelles, ainsi que d’évaluer la qualité d’expérience fournie par le simulateur en termes de sentiment de présence et de *cybersickness*. Les utilisateurs réguliers ont réalisé cette tâche dans un temps similaire à la fois dans le simulateur et avec un vrai fauteuil roulant électrique.

Nous avons également évalué des niveaux élevés de sentiment de présence, ce qui se traduit par un bon niveau de qualité de l’expérience. Le niveau de *cybersickness* s’est avéré correct pour une étude clinique mais reste à être amélioré pour des personnes sensibles. Enfin, cette étude a été la première étude clinique dans laquelle des personnes en situation de handicap et donc des utilisateurs finaux ont pu utiliser notre simulateur dans un contexte ciblé. Tous les commentaires des participants concernant le simulateur et l’étude dans son ensemble ont été positifs, ce qui est prometteur pour l’avenir.



FIG. 2.7 – Un utilisateur régulier avec les deux conditions : virtuelle et réelle [VDP⁺ 21]

Nous avons également amélioré ou facilité l’une des chaînes de contrôle des fauteuils roulants électriques autonomes ou semi-autonomes. En particulier, nous nous sommes intéressés à la planification de trajectoire, et notamment à l’algorithme *Rapidly-exploring Random Tree* (RRT). Nous avons proposé et développé une nouvelle version de RRT appelée CBB-RRT* (Cubic Bézier Based RRT*) produisant des trajectoires directement réalisables par des robots non holonomes tels que des fauteuils roulants électriques [VGB21]. Ce planificateur de chemin local est basé sur les courbes de Bézier cubiques et génère des courbes continues. Les trajectoires ainsi produites par cet algorithme sont lisses afin de les rendre confortables pour l’utilisateur.

Simulateur de marche pour patients sortant d’un coma

La RV est déjà utilisée en rééducation pour les patients atteints de pathologies neurologiques avec succès [RMCSB20]. En partenariat avec le service de Médecine Physique et de Réadaptation du CHU de Rennes, le projet VERARE A.3 porté par l’équipe Hybrid utilise la réalité virtuelle au service de la rééducation des patients atteints du Covid-19.

Nous proposons aux patients sortis de réanimation qui ne peuvent pas encore remarcher une rééducation en RV. Muni d'un casque de RV, le patient, alors qu'il est allongé dans son lit d'hôpital, voit son avatar en train de marcher à différentes allures dans des environnements virtuels extérieurs. Le projet a été réalisé dans un temps très court compte tenu de l'urgence du contexte sanitaire. Le moteur #SEVEN est utilisé pour la scénarisation de l'application. Même si elle est pour le moment très simple, cela a permis d'accélérer le temps de développement. #FIVE quant à lui n'a pas été utilisé car il n'y a pas d'interaction au sens relation avec les objets de l'environnement dans cette application.

Nous espérons montrer que ces patients atteints du Covid-19 bénéficiant d'une rééducation en RV pourront retrouver leur fonction de mobilité plus efficacement que les patients avec une rééducation classique. Une expérimentation est en cours au CHU de Rennes dont l'objectif est d'évaluer les apports du simulateur.

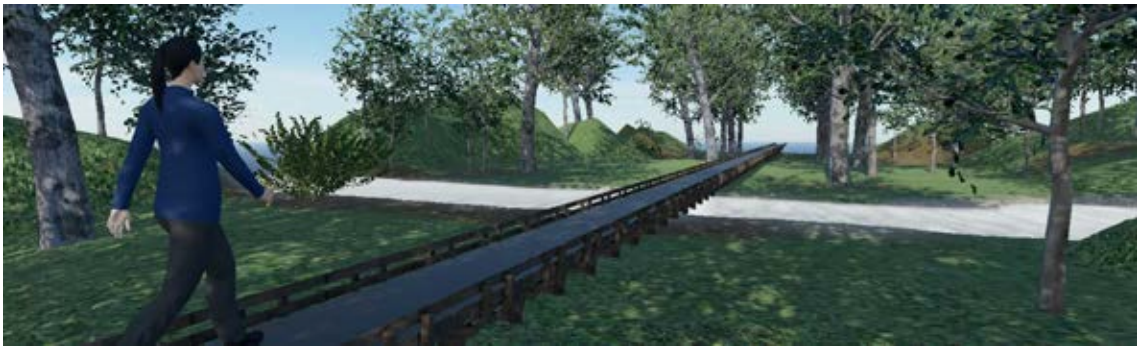


FIG. 2.8 – *L'utilisatrice voit son avatar marcher dans une forêt @Inria*

Simulateur d'activités pour le retour au travail de patients cancéreux

Un autre exemple d'utilisation de la RV pour la rééducation concerne la reprise d'activité professionnelle suite à un traitement de pathologie cancéreuse. Cette reprise d'activité est actuellement abordée uniquement par des techniques de rééducation classiques [CMH⁺19, NFB⁺19]. Plus généralement, les MOOCs peuvent être utilisés par les personnes souffrant de troubles cognitifs [CGS21].

En partenariat avec le service de [Médecine Physique et de Réadaptation du CHU de Rennes](#) et l'[INSERM Anticipo](#) (plateforme Cancer et Cognition) de Caen, nous avons lancé en octobre 2021 le projet VIVRA (Virtual environments for Vocational Rehabilitation After breast cancer). L'objectif est de concevoir et de tester une application adaptative de réalité virtuelle permettant l'entraînement des fonctions cognitives de patientes traitées pour un cancer du sein et ayant une plainte cognitive suite au cancer et aux traitements, dans le but de faciliter leur reprise d'activité professionnelle. Une série d'expérimentation sur des patientes est également prévue à Caen et Rennes. Cette méthodologie s'adaptera au niveau de réussite et l'état perçu de la patiente avec une mise en situation scénarisée. Nous nous baserons sur le modèle de scénarisation #SEVEN qu'il faudra adapter pour qu'il prenne en compte des critères liés à la patiente comme son aisance dans l'exécution d'une tâche, son niveau de fatigue, sa charge mentale, ou le stress. Cet état sera mesuré à l'aide de plusieurs techniques utilisées régulièrement dans l'équipe Hybrid comme les capteurs physiologiques (rythme cardiaque, réponse électrodermale) ou les mesures subjectives (charge mentale, fatigue utilisateur, confort, etc). Nous utiliserons le modèle #FIVE pour l'environnement 3D réactif.

2.2 Domaine du bâtiment

Pour les secteurs d'activités du bâtiment, des logiciels liés à la maquette numérique existent. Cependant, la création des applications de RX personnalisées soit à un utilisateur ou à une maquette numérique est effectuée sans genericité et implique par conséquent un temps de développement important. Nous avons étudié les domaines de la conception (Section 2.2.1) et la construction (Section 2.2.2).

2.2.1 Domaine de la conception

De multiples applications de RV voient le jour pour fournir des solutions de réunions (revues de projet) de conception multi-utilisateur en complément des systèmes de type CAO. Sans support, la création d'applications dédiées à chaque utilisateur final implique un temps de développement important. Ces travaux ont été effectués dans le cadre de l'IRT [b<>com](#) en collaboration avec la société [HDG](#) (Human Design Group), dans le cadre du projet SmartCave [A.3](#).

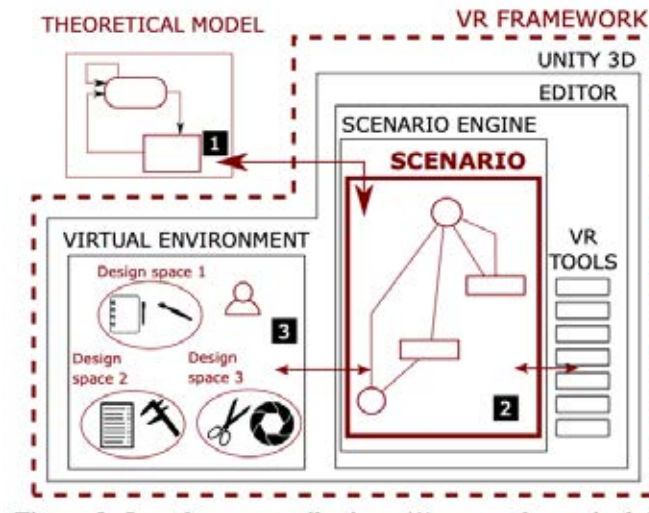


FIG. 2.9 – En rouge, contribution : (1) un nouveau modèle théorique de conception définissant les activités génériques de conception, (2) un scénario décrivant le nouveau modèle théorique, et (3) une implémentation du scénario dans un EV [TGB⁺ 20]

Nous avons proposé un Framework RV basé scénario pour faciliter la création d'applications personnalisées et multifonctions de co-conception (Fig. 2.9) [TGB⁺20]. Pour cela, nous avons proposé un modèle de conception collaborative pour décrire les activités génériques de conception et structurer leurs enchaînements. Ce modèle intègre trois espaces de conception (problème, solution et évaluation) qui co-évoluent grâce à la réalisation d'activités produisant des représentations externes (Fig. 2.10). Chaque espace possède donc des activités dédiées permettant de créer ou modifier du contenu. Nous avons retranscrit de manière directe les activités de chaque espace via des scénarios #SEVEN. Notre modèle intègre deux types de collaboration directe permettant à chaque utilisateur soit d'agir individuellement sur du contenu ou soit d'agir conjointement sur le même contenu.

Le Framework RV retranscrit le modèle de conception grâce à des scénarios utilisant le moteur de scénario #SEVEN. Le Framework possède trois couches de scénario #SEVEN, d'abord pour piloter la collaboration et la sélection d'objets, ensuite pour piloter les fonc-

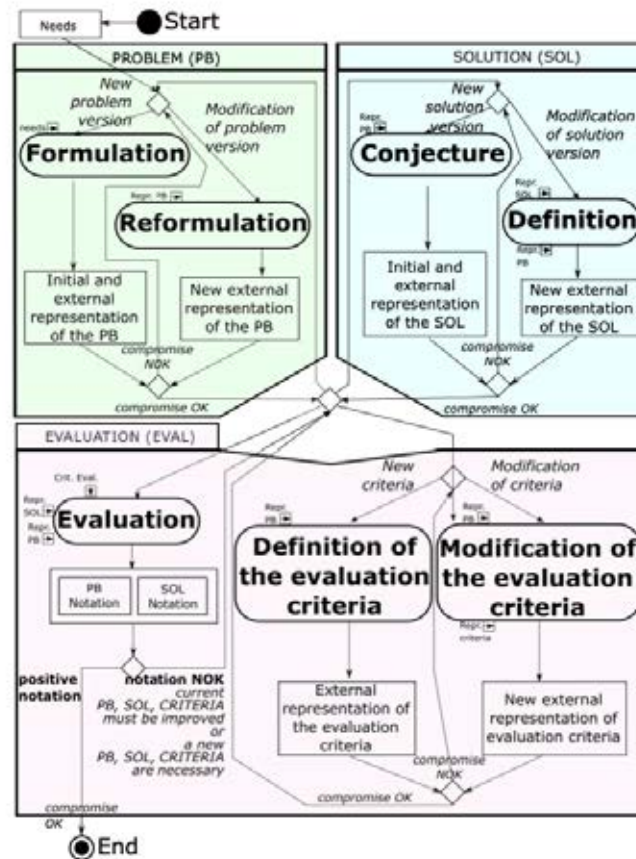


FIG. 2.10 – Notre modèle de conception théorique générique représente : trois espaces (problème, solution et évaluation) avec sept activités associées. [TGB⁺20]

tionnalités de choix d'espace et d'outil et enfin pour piloter les activités.

Le Framework fournit également des informations aidant à établir une compréhension commune de l'état de conception, ainsi que la communication audio et la représentation par avatar de chaque utilisateur. Ainsi grâce à ce Framework, les développeurs peuvent créer de multiples applications dédiées à la conception collaborative en environnement virtuel et les personnaliser en changeant les objets de conception, l'environnement 3D et les outils de conception [TGB⁺21].

Nous avons montré que le modèle #SEVEN était directement utilisable pour ce framework. Nous avons illustré la méthodologie avec une application de RV dédiée à la co-conception de l'aménagement d'une salle de contrôle dans un cadre industriel. Cette application permet à deux personnes distantes d'itérer sur des solutions d'aménagement et de les évaluer grâce aux outils de conception intégrés au framework. Par exemple, un ergonome ayant le rôle de superviseur présente à un second ergonome de rôle concepteur des déclinaisons de configuration du poste de travail de tables en mode collaboration forte (Fig. 2.11 (a) Les scénarios des deux utilisateurs sont en attente, (b) l'utilisateur au rôle de superviseur (en rouge) sélectionne les tables comme objet de focalisation pour le groupe, (c) ce qui est détecté simultanément par les scénarios des deux utilisateurs et (d) tous les scénarios avancent à l'étape suivante).

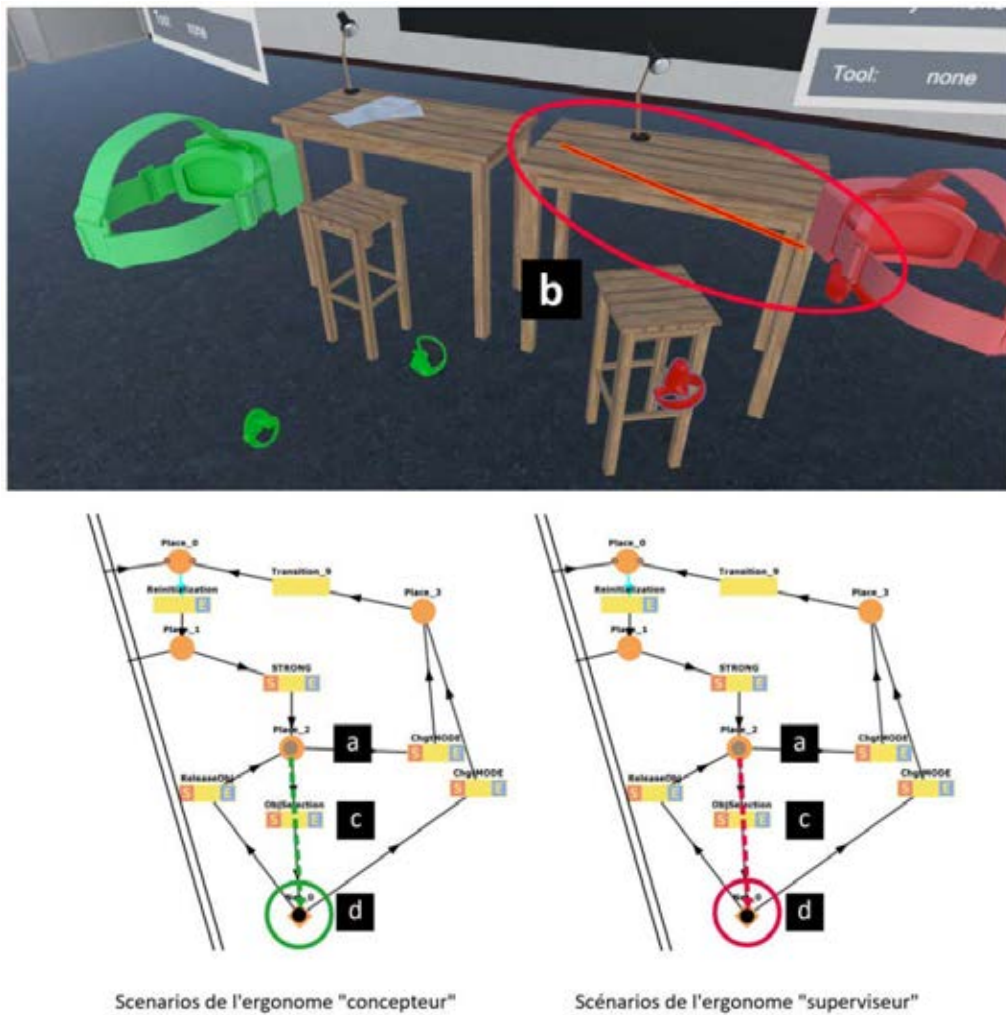


FIG. 2.11 – Exemple de la sélection de l'objet de focalisation en mode collaboration forte.

2.2.2 Domaine de la construction

Nous nous sommes intéressés au domaine de la construction de bâtiment pour lequel la sécurité est une préoccupation constante. Lorsqu'un accident se produit, il est souvent grave. Actuellement, pour sensibiliser et former les travailleurs aux procédures de sécurité, les centres de formation organisent des sessions de chasse aux risques où des équipements réels sont installés de manière incorrecte. Le stagiaire peut observer ces environnements en toute sécurité et est censé signaler les situations à risque.

Comme nous l'avons fait pour le bloc opératoire en chirurgie, nous avons proposé une session de chasse aux risques en RV pour un chantier de construction. Grâce à la RV, nous pouvons placer le stagiaire dans un environnement de construction complet, personnalisé, avec des dangers potentiels sans engager sa sécurité [DLGA18a]. Nous avons conçu un environnement virtuel avec l'objectif de montrer l'importance d'apprendre à corriger les erreurs et pas seulement les détecter. La méthodologie de création de cet environnement scénarisé découle du chapitre 1 (Sections 1.4.3 et 1.5.2). Grâce aux interactions proposées dans l'EV, en utilisant le moteur #FIVE, le stagiaire a la possibilité d'agir sur les objets qui l'entourent. Dans un second temps, grâce à un scénario décrit dans le langage #SEVEN,

nous avons ajouté des conséquences au fait de ne pas corriger une erreur. Par exemple, le fait de ne pas réparer une erreur dans un échafaudage peut entraîner son effondrement ultérieur. Ainsi le stagiaire prend mieux conscience des conséquences dramatiques qui peuvent survenir lorsque les erreurs ne sont pas corrigées.



FIG. 2.12 – À gauche le chantier réel et à droite l'environnement virtuel du chantier

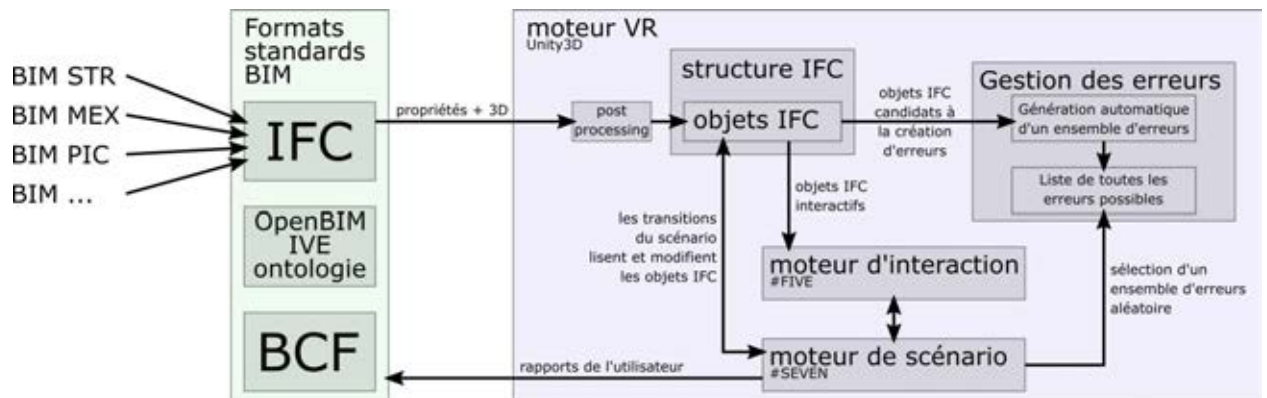


FIG. 2.13 – Schéma de la génération du parcours de chasse aux risques

Nous avons donc mis en place un processus semi-automatique pour que le bâtiment virtuel d'étude soit celui sur lequel les ouvriers du bâtiment travaillent réellement dans l'état courant de la construction, ce qui ajoute un degré de présence et d'immersion supplémentaire (Fig. 2.12). Cette instanciation nécessite seulement quelques jours de développement alors qu'auparavant l'ordre de grandeur était de un à deux mois. Pour cela, plusieurs modèles BIM ont été utilisés (dont BIM MEX qui contient le matériel nécessaire à la mise en sécurité). Ces maquettes sont chargées au format IFC dans le moteur de jeu Unity en passant par un intégrateur (Fig. 2.13).

Une pré-étude d'utilisateur a été réalisée en interne par Vinci Construction France sur des ouvriers du bâtiment. L'application a été déployée sous casque de VR sur le lieu de leur chantier avec le même chantier en virtuel. L'objectif a été d'évaluer l'acceptabilité de la formation en RV et de quantifier les effets à court terme et à long terme de la

formation. L'acceptabilité de la formation en RV a été évaluée à l'aide de questionnaires pour la charge de travail perçue, la présence. L'efficacité de la formation a été évaluée par un test de connaissances effectué avant la formation, après la formation et un mois après la formation. À ce jour, cette pré-étude a été réalisée avec un échantillon trop réduit d'utilisateurs pour conclure, mais les résultats semblent très encourageants.

2.3 Domaine des arts numériques

La RX ouvre un champ de créativité artistique immense pour les arts numériques. Nous avons commencé à nous intéresser au domaine du cinéma et notamment aux films VFX (avec effets spéciaux) pour lesquels un acteur peine à s'immerger dans l'univers des scènes du fait de jouer sur un fond vert (Section 2.3.1). Nous avons par la suite conçu une application artistique sonore et immersive où l'utilisateur est le chef d'orchestre d'une machine industrielle (Section 2.3.2). Toujours dans la thématique musicale, nous avons proposé une expérience visuelle et sonore en RV d'exploration des périodes de l'histoire de la musique (*EvoluSon*, Section 2.3.3). Nous avons ensuite étudié comment les technologies de capture de mouvement peuvent être utilisées par un artiste lors d'une performance musicale sans utiliser la RX (VisInsita, Section 2.3.4). Nous avons défini une œuvre sous la forme de récit numérique en RV d'une peinture (Léonard de Vinci) et de son contexte (*The Last Supper Interactive*, Section 2.3.5). Enfin, nous avons conçu une œuvre collaborative de co-création d'un univers insitant sur le sentiment de lâcher prise (*Creative Harmony*, Section 2.3.6).

2.3.1 Cinéma VFX

Nos travaux sur la scénarisation et la formation en RX nous ont naturellement conduits au domaine du cinéma et notamment pour la préparation d'un acteur à sa performance. Nous nous sommes intéressés à l'utilisation de la RV pour que les acteurs répètent des scènes incluant des effets spéciaux.

Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec Technicolor (Interdigital), Ubisoft, l'École Nationale Supérieure Louis Lumière et Polymorph, dans le cadre du projet FUI PREVIZ A.2.

Dans la majorité des films VFX, les acteurs doivent jouer devant un écran monochromatique vert ou bleu, avec pratiquement aucun indice du décor numérique qui est censé les entourer. Cet exercice se résume à des compétences très différentes de celles utilisées dans le jeu traditionnel (un décor détaillé complet contre un écran monochrome, des partenaires réels contre des partenaires virtuels ou symboliques). Les acteurs doivent prétendre partager le plateau avec des créatures imaginaires alors qu'ils sont, en fait, seuls sur un plateau vide avec seulement quelques repères. La performance des acteurs doit également respecter un timing précis, des positionnements précis ainsi que des gestes précis afin d'éviter un coût supplémentaire en post-production lors de l'adaptation de l'image de synthèse aux images réelles.

Notre application de répétition d'acteurs en RV repose sur deux composants principaux : un environnement interactif (basé sur le modèle #FIVE) et un scénario interactif (basé sur le modèle #SEVEN) [BGA16] (vidéo³). D'une part, l'environnement entièrement interactif permet aux acteurs d'interagir librement avec les objets de l'environnement ainsi qu'avec les personnages virtuels. D'autre part, le scénario interactif permet de synchroniser

3. <https://www.youtube.com/watch?v=C1dAJ52LjY>



FIG. 2.14 – Les environnements d’entraînement pour les deux modalités (RV, image de gauche et image du milieu). L’image de droite montre le plateau de tournage réel [BGA16]

les actions du scénario avec le jeu de l’utilisateur. Ainsi, les acteurs peuvent se concentrer sur le jeu et les dialogues plutôt que sur la synchronisation des animations comme ils doivent le faire lors de répétitions réelles.

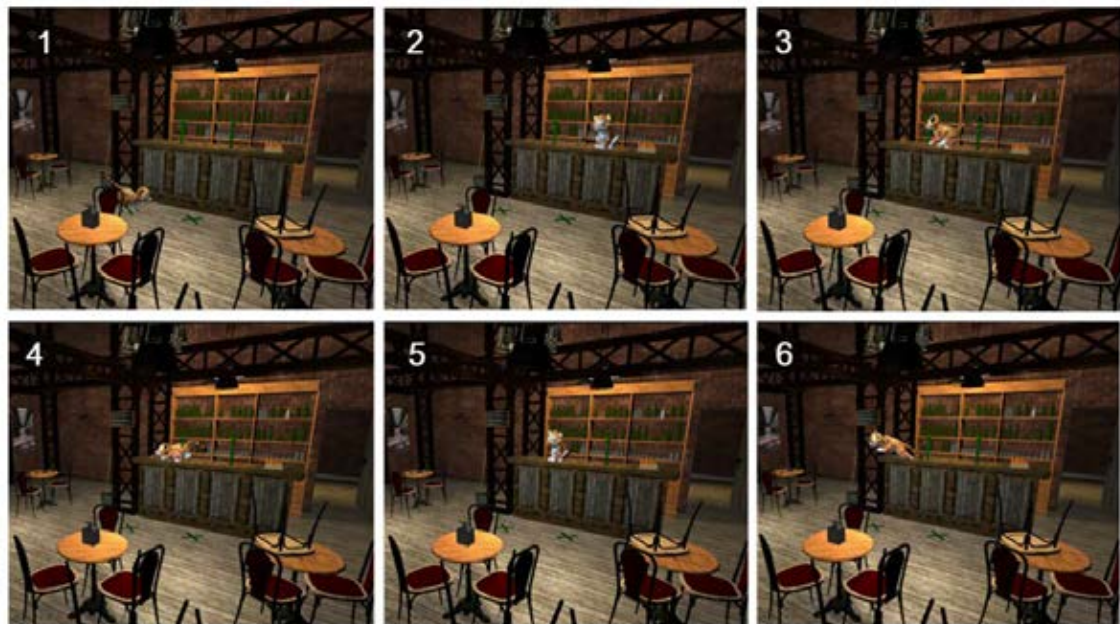


FIG. 2.15 – Le scénario utilisé pour notre expérience comprend un tigre virtuel avec lequel l’acteur doit interagir : les 6 images montrent les positions clés du tigre pendant la scène. [BGA16]

Dans une étude expérimentale, nous avons comparé le processus de répétition classique avec une répétition en RV. Les 24 participants ont été séparé en deux groupes selon la modalité. Dans chaque groupe, la moitié des participants étaient novices et l’autre moitié avait des connaissances du métier d’acteur. Les deux modalités contiennent les mêmes repères : deux croix sur le sol, deux bâtons et deux croix sur le bar ainsi que des sons pour la synchronisation (Fig. 2.14). Dans le scénario de l’étude, nous avons extrait trois points de synchronisation (PS), c’est-à-dire des moments du scénario qui nécessitent une synchronisation précise de l’acteur avec son partenaire virtuel, un tigre selon les six actions :

(1) le tigre passe entre les jambes de l'acteur (PS1), (2) le tigre monte sur le bar et regarde l'acteur (PS2), (3) l'acteur prend une orange et la pose sur le bar (4), le tigre attrape l'orange (5) l'acteur prend l'orange dans la gueule du tigre (PS3) et (6) le tigre saute du bar (Fig. 2.15). Les points de synchronisation impliquent des cibles particulières (comme par exemple des marques au sol ou sur le bar) que l'acteur doit tenter de suivre le plus précisément possible.

Nous avons enregistré des critères quantitatifs comme la distance de la cible et la direction du regard par rapport à la cible pour les points de synchronisation et des critères subjectifs comme le positionnement sur le plateau, le suivi du regard, le fait de se sentir à l'aise avec les gestes, l'engagement émotionnel, l'utilisation de l'espace et la confiance en soi.

Les résultats ont montré que la répétition en RV peut remplacer la répétition classique puisque les acteurs ont les mêmes performances qu'ils soient entraînés en RV ou dans un environnement classique tout en offrant beaucoup plus de flexibilité quant au lieu et au moment où les répétitions peuvent avoir lieu.

Les données qualitatives recueillies montrent que les acteurs apprécient les répétitions en RV. Dans leurs commentaires, les acteurs ont apprécié l'entraînement en RV et ont déclaré avoir une meilleure vision du décor virtuel. Plusieurs des acteurs formés en RV ont déclaré que le fait d'expérimenter la taille du tigre en RV les a considérablement aidés à simuler le passage du tigre entre leurs jambes. Ils ont trouvé facile d'improviser l'action du tigre pendant les répétitions et de la reproduire pendant le tournage. Ils déclarent se sentir plus impliqués dans leur jeu et que moins de concentration est nécessaire pour intégrer les compétences requises lors du tournage.

Notre étude a également révélé que les acteurs préfèrent la formation RV à la formation classique. Les participants ont déclaré qu'il était plus facile de s'engager dans leur jeu lorsqu'ils répétaient en RV. Le décor vert nécessite plus de concentration pour offrir le même engagement mental.

Enfin, notre approche de la répétition en RV fournit d'autres informations aux acteurs en ajoutant un environnement interactif avec un scénario interactif, ce qui pourrait les préparer pour des scènes potentiellement bien plus complexes et donc difficiles à appréhender pour les acteurs sans RV.

2.3.2 Orchestre virtuel et Sonore

Nous avons conçu une application immersive sonore interactive et artistique où les utilisateurs perçoivent des retours sonores et visuels sur leurs interactions avec un environnement virtuel. Nous avons fixé des critères comme le fait d'être facile d'accès pour des utilisateurs de type grand public et illustrer de manière ludique l'utilisation des sons en RV [SNGG14] (vidéo⁴).

Dans cette application, les utilisateurs jouent le rôle de chefs d'orchestre d'une usine de machines, chacune de leurs actions sur les dispositifs d'interaction déclenche des réponses visuelles et sonores (Fig. 2.16). Les stimuli audio ont été spatialisés autour de l'auditeur. Le sentiment d'immersion, associé aux interactions intuitives avec l'environnement visuel et sonore, a fourni aux visiteurs une illustration ludique des sons spatialisés en RV à laquelle le public a donné des retours de satisfaction encourageants. Sur le plan scientifique, ce travail a également abordé la mise en œuvre d'outils acoustiques sur l'effet de salle (essentiellement

4. <https://www.youtube.com/watch?v=6acyypauG6U>



FIG. 2.16 – *L’orchestre virtuel pour des machines d’usine, plateforme Immersia* [SNGG14]

réverbération) en temps réel dans de grands systèmes immersifs par haut-parleurs.

L’application a été exposée lors de la journée Science et Musique 2013 (JSM 2013) et conçue pour être utilisée dans la plateforme Immersia.

2.3.3 EvoluSon

Le projet EvoluSon propose une expérience immersive interactive et sonore où le spectateur explore une représentation visuelle et musicale des principales périodes de l’histoire de la musique occidentale [GNR⁺18].

Cette œuvre a été réalisée en collaboration avec l’équipe Arts pratiques et poétiques de l’Université de Rennes 2, des étudiants de l’ESIR (Université Rennes 1) et de l’Université de Rennes 2.

Le contenu musical est constitué de compositions musicales originales basées sur le thème de l’Art de la Fugue de Bach pour illustrer les huit grandes époques musicales de l’Antiquité à l’époque contemporaine. Pour chaque époque, différentes interactions sont proposées à l’utilisateur, avec une progression dans leur complexité. Les interactions sont également de plus en plus liées à la musique lorsqu’on avance dans le temps.

L’univers graphique d’EvoluSon est une succession de huit salles ou paysages et chacun représente l’une des huit époques historiques musicales présentées dans le projet. Chaque époque est caractérisée par des indices visuels forts, empruntés à différents domaines artistiques tels que l’architecture, la peinture, le cinéma ou les jeux vidéo. Il ne s’agit pas de fournir une reconstitution exacte de chaque époque, mais de proposer un environnement graphique facilement identifiable par l’utilisateur comme par exemple une reconstitution d’un tableau de Friedrich pour illustrer la face sombre du romantisme (Fig. 2.17). Les huit époques de la musique sont l’Antiquité, le Moyen Âge, la Renaissance, le Baroque, le Classique, le Romantisme (Fig. 2.18), le Moderne et le Contemporain.

Le projet EvoluSon contribue à la fois à l’utilisation de la RV pour la représentation de la culture immatérielle et à l’art numérique interactif qui place l’utilisateur au centre de l’expérience. Le projet EvoluSon se concentre sur la musique à travers une présentation de l’histoire de la musique occidentale, et utilise la réalité virtuelle pour valoriser les différents morceaux à travers les âges. L’utilisateur est immergé dans un environnement visuel et sonore cohérent et peut interagir avec ces deux modalités.

L’œuvre a d’abord été présentée dans la plateforme Immersia à l’occasion de la Journée Science et Musique 2016 JSM 2016. Les visiteurs ont été invités à évaluer l’expérience immersive et les interactions avec les environnements visuels et musicaux à l’aide de ques-

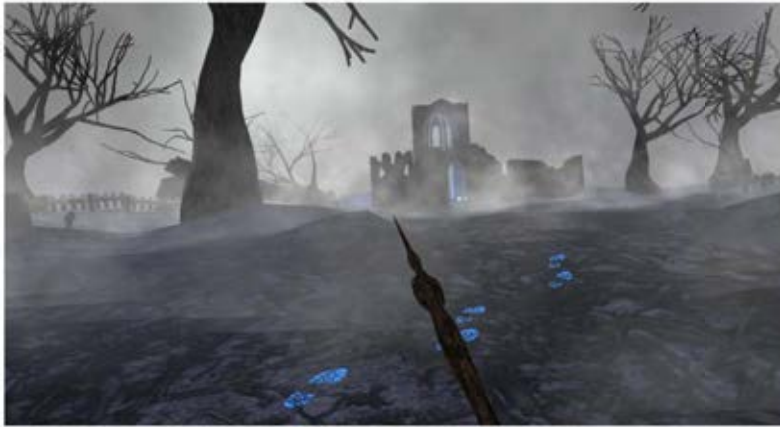


FIG. 2.17 – *Époque romantique : scène inspirée du tableau de Friedrich, Cimetière d'un cloître sous la neige*



FIG. 2.18 – *Époque romantique : La salle de bal, inspirée de la comédie musicale d'animation romantique de Walt Disney La Belle et la Bête et du film de Terry Gilliam Les aventures du Baron de Munchausen*

tionnaires. Les résultats ont montré un accueil très favorable des utilisateurs à l'expérience proposée.

La cohérence dans la conception du contenu visuel, des compositions musicales et des interactions, par rapport aux différentes époques de l'histoire de la musique occidentale permettent de promouvoir EvoluSon comme une application de RV utile pour l'éducation à la culture et au patrimoine.

Elle a ensuite été présentée lors d'un autre événement public consacré à l'art et à la science, à l'aide d'une installation basée sur les casques de RV. Nous continuons de la présenter lors de divers événements scolaires destinés aux lycéens et aux étudiants, ou bien lors de visites scientifiques, soit sur des casques, soit dans la plateforme Immersia.

2.3.4 VisInsita

Nous avons participé au projet de performance de musique électronique VisInsita de l'artiste [Nicolas Bazoges](#). Cette application n'utilise pas la réalité virtuelle mais met en

œuvre la conception d’interfaces expérimentales basées sur la technologie de capture optique du mouvement avec des marqueurs infrarouges passifs (MoCap), et l’analyse de leur utilisation dans un contexte réel de présentation scénique avec l’objectif d’étudier l’apport en terme d’expressivité lors d’une performance artistique [BGN⁺19].



FIG. 2.19 – *Le pendule lumineux équipé de sa cible infrarouge passive* [BGN⁺19]



FIG. 2.20 – *Aperçu de la performance VisInsita (2018)* [BGN⁺19]

Du fait de la prédisposition de la MoCap à capter les mouvements du corps, de nombreuses recherches et applications musicales dans le domaine du spectacle vivant concernent la danse ou la sonification du geste. Pour cette recherche, nous avons voulu nous éloigner de la capture du corps humain pour analyser les possibilités d’un objet tangible et cinétique manipulé par un artiste, à la fois en termes d’expression musicale, mais aussi dans le contexte plus large d’une interprétation scénique multimodale.

Un pendule lumineux (Fig. 2.19) suspendu au centre de la scène (Fig. 2.20) et manipulé par l’artiste est capté par un dispositif permettant de relier ses mouvements à différents paramètres sonores. Pour une plus grande variété de mouvements et de contrôles instrumentaux, nous avons décidé d’utiliser deux autres objets de type cibles infrarouges passives. Le premier était fixé sur la tête de la guitare basse électrique, modulant en temps

réel le son de cette dernière en fonction de son mouvement sur scène, ainsi que l'intensité lumineuse du pendule. La guitare devenait ainsi un instrument augmenté. La seconde cible infrarouge passive était associée à une percussion électronique. Elle était fixée sur le poignet gauche de l'artiste et modulait différents traitements sonores qui modifiaient les sons de ces percussions en fonction des mouvements tridimensionnels du poignet. Ces percussions étaient elles-mêmes connectées directement au logiciel d'éclairage afin d'allumer certains projecteurs de manière synchronisée avec les coups de tambour.

Cette performance a été notamment exposée à la Journée Science et Musique 2018 au Diapason de l'Université de Rennes 1 ([JSM 2018](#)) et à la scène du Tambour de l'Université de Rennes 2 lors du festival d'arts numériques *Maintenant* en 2019. La performance [VisInsita](#) continue d'évoluer et d'être présentée par l'artiste impliqué dans le projet.

2.3.5 The Last Supper Interactive

The Last Supper Interactive (LSI) est un récit numérique expérimental immersif et virtuel, basé sur *La Cène*, une fresque murale de Léonard de Vinci datant de la fin du XVe siècle et située dans le réfectoire du couvent de la Basilique Santa Maria delle Grazie à Milan (Italie).

Réalisée en collaboration avec [Franz Fischaller](#), artiste chercheur-numérique, cette œuvre propose une expérience immersive entre Art, Culture, Patrimoine et RV.

LSI permet au public de visiter la fresque dans son contexte et d'en explorer les détails en haute résolution grâce à une numérisation 8K de la fresque et un scan laser complet de la Basilique et des bâtiments alentour (Fig. 2.21). Elle met également en avant un outil virtuel qui visualise le théorème d'Alberti utilisé par De Vinci en un dispositif d'apprentissage (appliqué par Léonard de Vinci pour réaliser la fresque) interactif immersif et virtuel (Fig. 2.22).

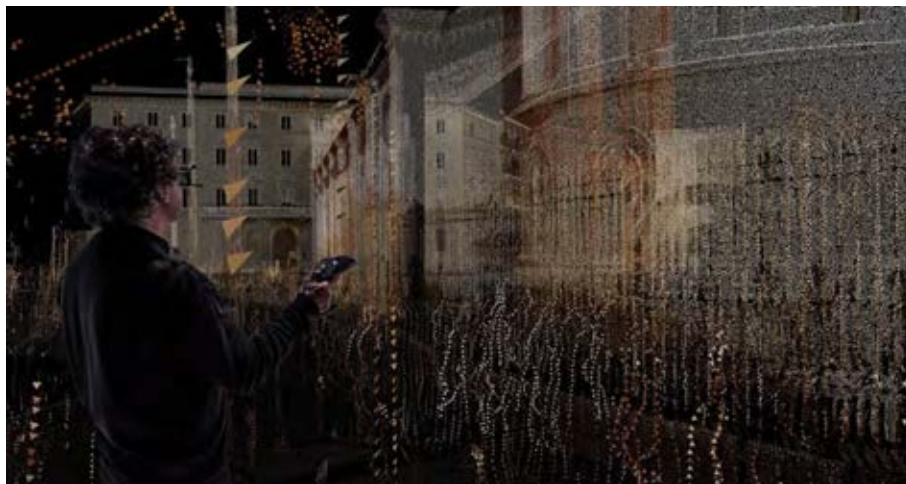


FIG. 2.21 – Visualisation du nuage de points de l'extérieur de la Basilique

Les visiteurs peuvent voyager grâce à des visualisations immersives de nuages de points basées sur nos travaux [[GPBG19](#)] (présentées en Section 3.2.4) et combinées à la simulation 3D du complexe architectural du monastère dominicain de Santa Maria delle Grazie où Léonard de Vinci a peint *La Cène* entre 1494 et 1498. Le scan laser (intérieur et extérieur) du complexe architectural du monastère dominicain de Santa Maria delle Grazie a été effectué par le département de mécanique de l'école polytechnique de Milan pour le projet

FIG. 2.22 – *LSI: Outil virtuel du théorème d'Alberti*

LSI.

Cette performance a été notamment exposée dans la plateforme Deep Space du musée d'arts numériques à Ars Electronica Center à Linz (Autriche) en 2019 dans le cadre du festival international Ars Electronica. Elle a fait l'objet d'un financement de l'Université de Rennes 1 pour l'accueil de l'artiste chercheur.

2.3.6 Creative Harmony

FIG. 2.23 – *Creative Harmony: danseuse dans le tableau de co-crédation de paysage dans Immersia (à gauche) et musicien en live dans Immersia (à droite)*

Nous avons conçu *Creative Harmony*, une œuvre en RV composée de deux espaces collaboratifs et participatifs, partageant le même monde virtuel. L'un de ces espaces est occupé par deux artistes-performeurs, un danseur (Fig. 2.23 à gauche) et un musicien (Fig. 2.23 à droite), le second espace est occupé par des spectateurs-utilisateurs en interaction

avec l'environnement numérique (Fig. 2.24). L'expérience consiste à créer un paysage virtuel global grâce aux gestes des utilisateurs en les invitant à un sentiment de lâcher prise. Les partenaires de création pourront faire apparaître et disparaître des éléments de l'environnement, recréant ainsi le monde virtuel dans lequel ils sont immergés.

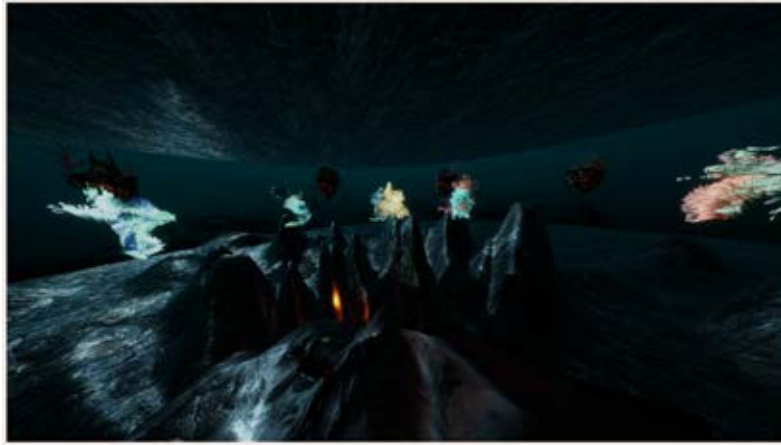


FIG. 2.24 – *Creative Harmony* : vue de l'utilisateur en co-crédation

Cette œuvre d'art est réalisée en collaboration avec [Julien Lomet](#), doctorant artiste numérique, Pierre Huyghe, musicien numérique, Johan Julien, chorégraphe numérique, l'équipe Arts pratiques et poétiques de l'Université de Rennes 2, l'INRV de Paris 8 et des étudiants de l'ESIR et l'INSA Rennes.

Un aspect particulier de l'œuvre est sa structuration en plusieurs tableaux successifs, qui s'enchaînent en se basant sur différents événements tels que les mouvements du danseur, le jeu du musicien, les interactions des utilisateurs, ainsi qu'un paramètre temporel. La gestion de ces enchaînements par événements en réalité virtuelle est basée sur le moteur de scénarisation #SEVEN qui sert à orchestrer les séquencements et enchaînements de l'œuvre. L'outil graphique de haut niveau va permettre aux artistes de faire évoluer et enrichir le déroulement de l'œuvre.

Dans un des tableaux, des utilisateurs évoluent d'un côté dans un fond marin dans une atmosphère paisible, et de l'autre, un danseur, accompagné d'un musicien en live, interagit sur la surface de la mer avec une lumière aurorale pour créer un paysage montagneux inspiré par l'esthétique de la peinture romantique allemande du 19ème siècle. Les personnes distantes se répondent mutuellement par le biais de leur corps et mouvements pour co-crédation cette expérience numérique collaborative.

Cette performance a été notamment exposée dans les plateformes Immersia et Deep Space du musée d'arts numériques à Ars Electronica Center à Linz (Autriche) en 2020 dans le cadre du festival international Ars Electronica, au LEV Festival Matadero à Madrid (Espagne) en 2021, ainsi qu'à la Journée Science et Musique 2021 ([JSM 2021](#)).

2.4 Outils de développement

Au regard de notre démarche dont l'objectif est d'augmenter la productivité des applications de RX, indépendamment du domaine applicatif, il est primordial de concevoir des outils logiciels spécifiques. Nous présentons les outils #FIVE et #SEVEN dans la Section 2.4.1, puis d'autres outils pour la productivité des applications de RX en Section 2.4.2.

2.4.1 Outils #FIVE et #SEVEN

Les modèles d'environnement 3D réactif #FIVE [BGB⁺15] et de scénarisation #SEVEN [CGBBA14] ont donné lieu à l'implémentation de logiciels déposés à l'APP (Agence pour la Protection des Programmes). Ces deux logiciels peuvent être utilisés séparément ou conjointement selon les fonctionnalités recherchées de l'application. Nous les utilisons actuellement dans nos applications de RX.

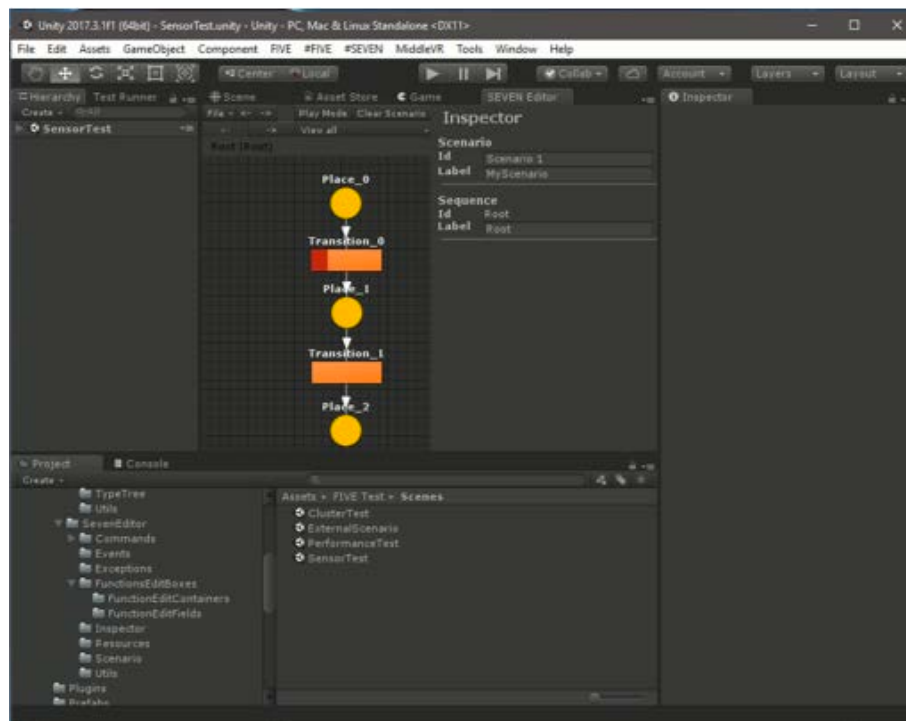


FIG. 2.25 – #FIVE et #SEVEN sont accessibles sous Unity (menus)

Les développements de base de #FIVE et #SEVEN ont pu bénéficier d'une montée en TRL (*Technology Readiness Level* ou niveau de maturité technologique) via la SATT Ouest Valorisation grâce à un programme de maturation A.3 (54=18x3 mois d'ingénieurs). Les outils présentés dans cette section ont bénéficié de cette maturation logicielle. Les moteurs #FIVE et #SEVEN ont été intégrés à Unity (Fig. 2.25) sous forme de plug-in.

Des éditeurs graphiques pour la création des types et relations #FIVE ont été développés. L'interface de l'éditeur de types (Fig. 2.26) permet à un utilisateur non-informaticien de spécifier des types d'objets propres à son métier en passant par des bibliothèques d'interactions usuelles. Afin de permettre à un utilisateur plus avancé d'aller plus loin dans la personnalisation de son application, un script C# éditable est fourni à l'utilisateur, au

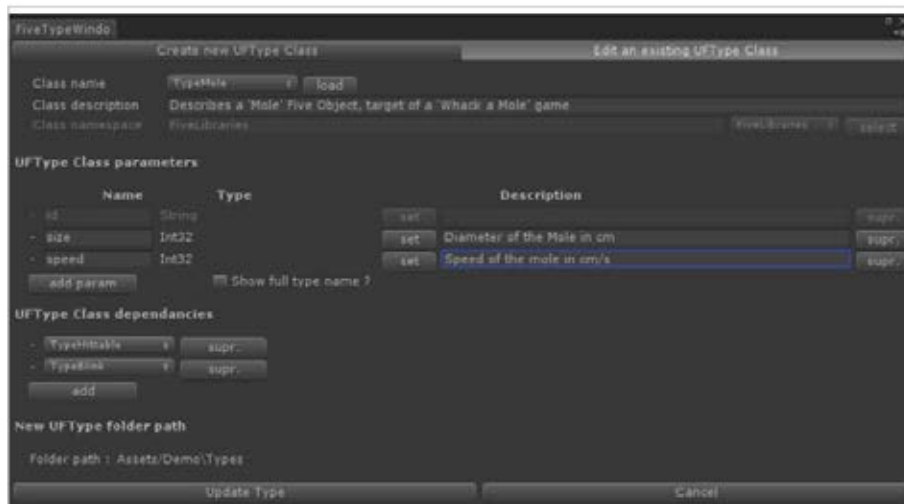


FIG. 2.26 – Interface de l'éditeur de types #FIVE

sein duquel il peut enrichir les types créés automatiquement par du code personnel. Ainsi, l'outil s'adapte au niveau de l'utilisateur pour fournir un contrôle à différents niveaux de technicité de l'interaction.

À l'image de l'éditeur de types, un éditeur de relation (Fig. 2.27) a été développé. Il permet, en quelques clics, de définir les paramètres de la relation, puis d'en générer automatiquement le code, avec validation du contenu. Le code généré est divisé en deux fichiers, un ne devant pas être modifié par l'utilisateur et l'autre étant à sa disposition pour ajouter manuellement du code personnel. De cette façon, nous assurons la facilité de création de contenu tout en garantissant un contrôle total à l'utilisateur.

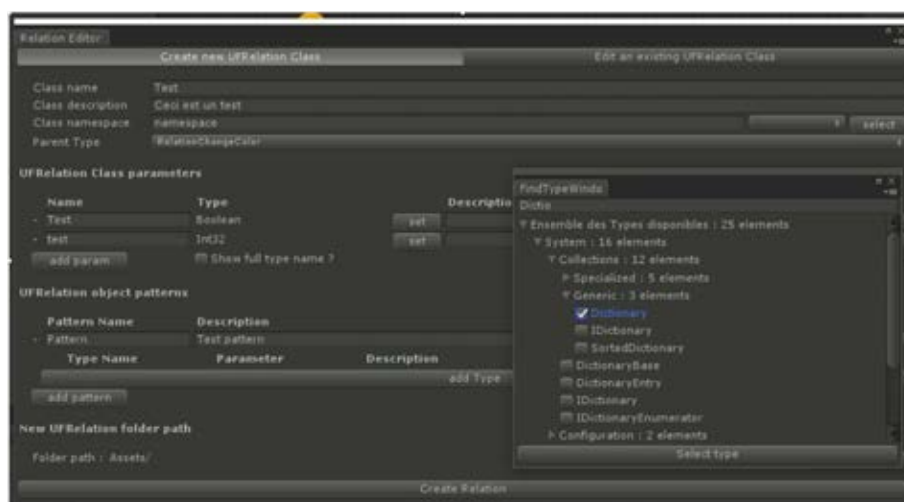


FIG. 2.27 – Interface de l'éditeur de relation #FIVE

Un éditeur de scénario #SEVEN (Fig. 2.28) a été développé. Cet outil, sous forme d'interface, est suffisamment simple d'utilisation pour être accessible à un non-informaticien et suffisamment riche pour permettre de décrire la grande diversité des scénarios envi-

sageables. Cette interface couvre le chargement, l'édition et la sauvegarde des scénarios. La création des places, transitions et arcs se fait en simples clics. L'édition de senseurs et effecteurs, est composée de menus déroulants. Il permet la création de sous-scénarios (écrits dans un même fichier) ou de scénarios externes (qui font appel à un autre fichier) utilisables dans différents scénarios. L'objectif a été la production d'un outil intégré, de sorte à obtenir une chaîne de production aussi simple que possible pour l'utilisateur final.



FIG. 2.28 – Interface de l'éditeur de scénario #SEVEN

Un système de priorité entre transitions #SEVEN a été ajouté et implémenté. Il permet d'étiqueter les transitions du scénario avec des valeurs numériques représentant leur priorité d'exécution. De cette façon, quand plusieurs transitions pourraient être activées simultanément, c'est la plus prioritaire qui sera choisie. Cela permet de créer des scénarios plus riches en multipliant les options offertes à l'utilisateur tout en évitant des incohérences dans l'exécution de ces scénarios.

Il est également possible d'ajouter de l'information au jeton. Pour enrichir le scénario, on peut ajouter des variables qui auront pour but d'influencer l'exécution du scénario. Ces variables peuvent provenir de l'environnement, grâce aux capteurs, mais il est possible d'intégrer de la variabilité via le scénario lui-même. Les variables seront alors stockées dans les jetons. Le scénario peut affecter des valeurs dans le jeton, mais il est aussi possible de les utiliser au travers de capteurs et d'effecteurs. Par exemple, dans un contexte collaboratif, pour garantir que dans un fil d'activité le même humain virtuel intervient (et pas un nouveau pour chaque activité), on peut ajouter au jeton une variable qui correspond au premier utilisateur qui a commencé une action du fil d'activité. Ainsi, ce sera le même humain virtuel qui effectuera les actions du fil d'activité (et pas un autre humain virtuel).

Lorsque le scénario a beaucoup de branches, il peut être compliqué à comprendre. Les décorations permettent d'ajouter des informations qui ne seront pas interprétées par

le moteur de scénario, mais qui peuvent être récupérées ensuite. Le format est un type et un ensemble de clés, valeur. Il est possible de mettre des décorations sur n'importe quel élément du scénario (place, transition, sous-scénario et sous-scénario externe). Par exemple, des décorations peuvent être utiles pour décrire des droits d'exécution sur les transitions. Cela permet, au lieu de gérer chaque acteur au cas par cas, d'avoir un seul scénario dans lequel chaque acteur peut vérifier s'il peut ou non déclencher la transition. Un éditeur de décorations a été développé et intégré au moteur de scénario.

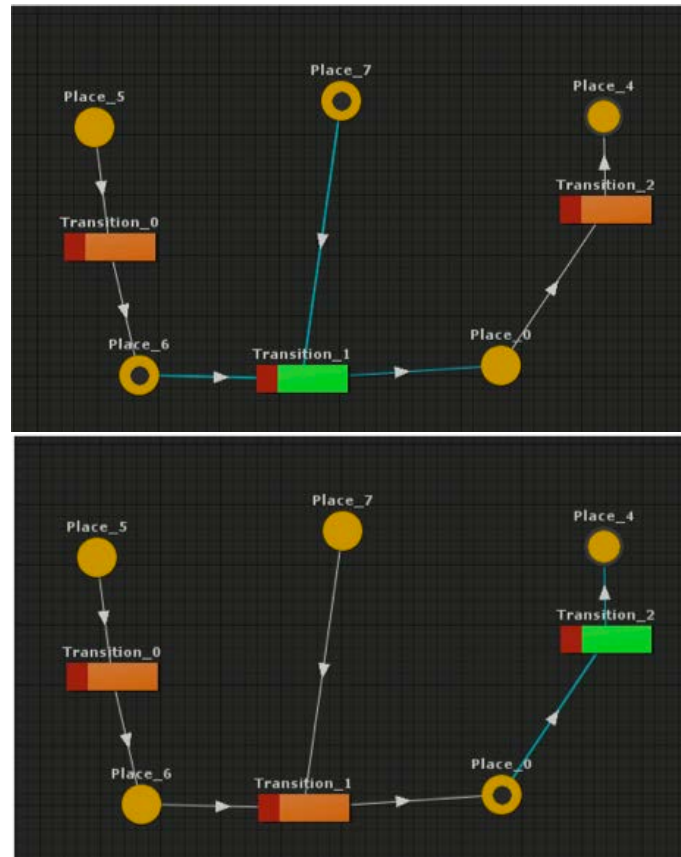


FIG. 2.29 – *Suivi temps réel de l'exécution du scénario #SEVEN*

Le suivi de l'exécution du scénario en temps réel a été réalisé sous la forme d'ajouts d'informations dynamiques en cours d'exécution. La coloration des transitions en temps réel en fonction de l'exécution du scénario et la mise en sur-brillance des arcs en attente d'activation ont été ajoutés (Fig. 2.29). Ce suivi temps réel permet à un formateur de suivre l'avancement de l'apprenant. Il permet également à un apprenant de suivre l'avancement du scénario d'un humain virtuel. Il peut également permettre à un utilisateur de suivre son propre avancement. Enfin, il permet au développeur de tester son scénario.

Pour guider un utilisateur à travers une tâche à réaliser à laquelle il n'est pas habitué, il est souvent nécessaire d'attirer son attention vers un objet en le mettant en évidence. Cette mise en évidence peut passer par un changement de couleur ou de taille de l'objet concerné, par une animation, un clignotement ou un signal sonore (Fig. 2.30 à gauche). Elle permet de guider l'utilisateur dans l'environnement, favorisant son immersion et pouvant lui éviter un sentiment de frustration. Un outil de mise en évidence a donc été implémenté pour

faciliter la mise en place et la gestion de l'ensemble des mises en évidence paramétrables d'un environnement virtuel #FIVE ou des actions du scénario #SEVEN (Fig. 2.30 à droite). Il permet notamment de gérer des mises en évidence par ordre de priorité, en leur attribuant une priorité à chacune. Le moteur va se charger de les mettre en marche ou de les éteindre en fonction des actions réalisées dans l'environnement virtuel et des priorités des mises en évidence.

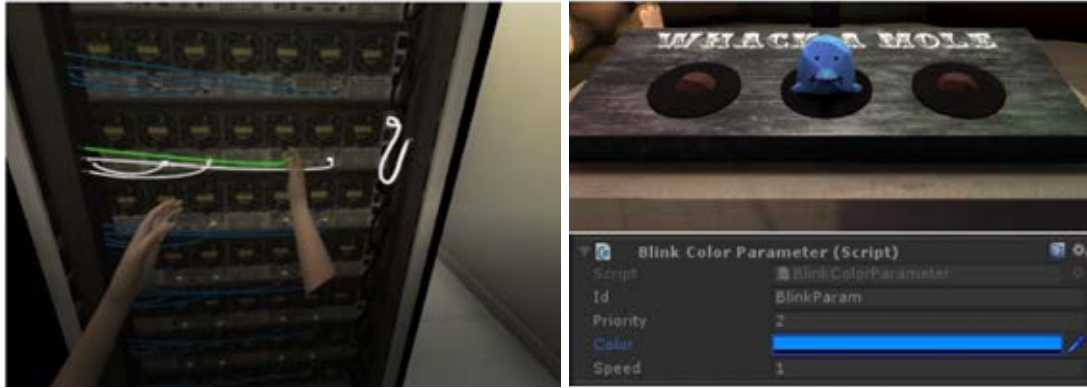


FIG. 2.30 – Mise en évidence d'objets avec une aide visuelle (à gauche) et interface de mise en évidence d'un objet (à droite)

2.4.2 Autres outils pour la productivité

D'autres outils n'ont pas bénéficié de maturation et sont à l'état de preuve de concept. Cette section rappelle et liste les outils présentés dans le chapitre précédent.

Un module de préhension d'un objet a été développé. Ce module permet sous Unity de définir des zones d'interaction et des poses précises de mains (doigts, articulation) sur les objets (Fig. 2.31).

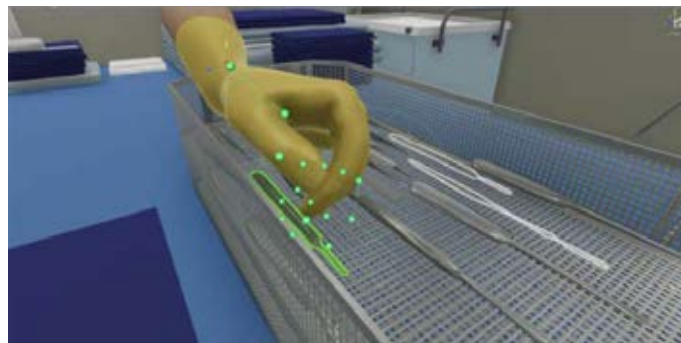
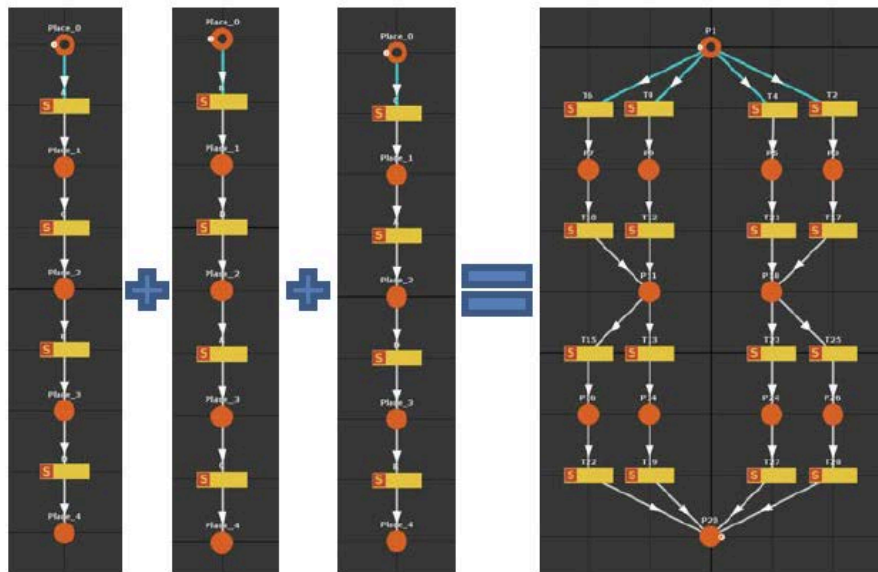


FIG. 2.31 – Exemple de préhension d'un objet scalpel

Nous avons également présenté différents outils permettant de définir un environnement 3D réactif. Tout d'abord la notion de *définir en faisant* qui permet à un utilisateur non informaticien en RX d'associer lui même les propriétés et capacités des objets et des relations (Section 1.4.2). Nous avons ensuite montré comment extraire les informations

provenant du BIM ou des ontologies pour enrichir l'environnement 3D réactif (Section 1.4.3).

Nous avons également montré que les outils liés à la scénarisation peuvent également bénéficier de ces informations sémantiques provenant du BIM ou des ontologies pour la création de scénarios basés séquençement d'actions (Section 1.5.2). Nous avons montré qu'il est possible de créer un scénario à partir d'observations réelles (Section 1.5.3). Nous avons présenté un outil de RV qui permet de *construire en faisant* pour définir un scénario par un utilisateur non informaticien (Section 1.5.3). Enfin, lorsqu'un scénario à une multitude de branches qui ont une certaine logique, nous avons montré qu'il était possible d'utiliser des outils mathématiques pour obtenir une généralisation de scénario à partir de peu de branches (Fig. 2.32). Cette généralisation (Section 1.5.3) peut se faire à partir d'observations réelles ou en RV.



simulateur permet également de tester et valider les algorithmes d'aide à la navigation du dispositif. Nous avons montré deux applications en cours d'étude, l'une dédiée à la reprise de la marche après un coma prolongé (dû au Covid par exemple) et une autre pour la reprise d'activité professionnelle (fonctions cognitives) des personnes ayant subi des traitements liés au cancer (du sein par exemple).

Nous avons également étudié le domaine du bâtiment et présenté des outils de co-conception d'une part et une application de formation dédiée aux risques sur les chantiers de construction qui utilise le chantier de l'ouvrier du bâtiment dans son état actuel de construction.

Enfin, nous avons montré avec plusieurs œuvres que la RX pouvait être utilisée largement dans le domaine des arts numériques avec une nouvelle forme de créativité possible.

La plupart des applications présentées utilisent les abstractions définies au chapitre précédent ainsi que les moteurs d'environnement 3D réactif basé sur le modèle objet-relation ou de scénarisation basé sur le séquençement d'actions que nous avons présenté succinctement dans ce chapitre.

Nous avons également résumé les outils de développement logiciel que nous avons utilisés pour augmenter la productivité des applications de RX, comme #FIVE et #SEVEN. Certains outils ont un niveau de TRL suffisant pour qu'ils soient utilisés par des professionnels. D'autres sont encore sous la forme de preuve de concept permettant de valider une contribution scientifique et qui nécessiteraient un peu de développement pour un passage à l'échelle auprès d'utilisateurs externes.

Chapitre 3

Focus sur le Patrimoine Culturel

Un des domaines applicatifs que nous souhaitons approfondir dans le cadre de nos travaux est le patrimoine culturel car il a assez peu bénéficié de la puissance de la RX à des fins scientifiques même si la RX est largement utilisée pour la valorisation. Les techniques de production de données 3D, bien que de plus en plus utilisées par les archéologues et les métiers du patrimoine culturel, se limitent le plus souvent à la production d’images 2D voire 3D. Au-delà des modes de visualisation de ces données, nous nous sommes interrogés sur leurs interactions et leurs usages possibles [ACC⁺18]. La RX permet d’envisager des interactions avec des environnements numériques 3D qui apportent une réelle plus value aux métiers du patrimoine culturel [GBL⁺22]. Il s’agit d’interactions qui peuvent être comprises à travers différentes modalités ou métaphores, associées à des procédures ou des gestes et potentiellement physiques, tangibles ou encore haptiques (avec retour d’effort). Ces interactions peuvent être intégrées par les archéologues dans les chaînes opératoires existantes ou nouvelles, ou encore faire partie d’une reconstitution fonctionnelle des procédures, gestes du passé ou contexte de l’étude, afin d’aider à comprendre un objet, un bâtiment, un site ou une activité humaine [GGD⁺14].

Les différentes études de cas présentées dans ce chapitre sont le fruit de collaborations avec les métiers du patrimoine culturel représentés par des archéologues, historiens, conservateurs, restaurateurs ou médiateurs. Elles illustrent différents types d’interactions dans les environnements 3D dans une reconstitution de leur contexte, spécifiques à ces métiers, qu’elles soient opérationnelles (support aux processus de fouilles) ou fonctionnelles (utilisation d’objets archéologiques, activités humaines du passé).

Le plan de ce chapitre est constitué comme suit. La méthodologie est définie en Section 3.1. Nous proposons une première structuration, en axes d’étude (voir, révéler, manipuler, partager), qui est présentée en Section 3.2 et une seconde forme de structuration selon les types d’interactions (fonctionnelles ou opérationnelles) en Section 3.3. Afin d’illustrer les travaux, des cas d’études sont détaillés en Section 3.4. Enfin, nous concluons ce chapitre en Section 3.5.

Ces travaux ont essentiellement été réalisés dans le cadre des projets CNRS Imag’in IRMA A.2 et de l’ANR INTROSPECT A.1.

3.1 Méthodologie

Nous commençons par un bref état de l’art et nous dressons les objectifs de la RX dans le domaine du patrimoine (Section 3.1.1). Nous en déduisons les défis que nous nous sommes fixés et nous présentons une proposition de méthode de travail en Section 3.1.2.

Enfin, une des particularité du domaine du patrimoine culturel réside dans la production des données numériques 3D, en effet ces techniques sont nombreuses, nous les présentons rapidement en Section 3.1.3.

3.1.1 Objectifs

La RX est largement utilisée pour la valorisation du patrimoine culturel mais reste rarement utilisée à des fins scientifiques. Les processus scientifiques basés sur la RX ont cependant connu un essor important ces dernières années. L'archéologie virtuelle a été introduite pour la première fois par Reilly en 1990 [Rei90] et a d'abord été présentée pour l'enregistrement des fouilles réelles et l'utilisation des technologies multimédia pour rejouer virtuellement la fouille. Krasniewicz a proposé en 2000 une infrastructure de visualisation à 360 degrés à l'aide de photographies pour aider les archéologues dans leurs travaux de recherche [Kra00]. Dans ce cas, l'archéologie virtuelle n'a pas été utilisée pour restaurer les connaissances, mais pour acquérir de nouvelles connaissances. Le Cloirec [LC09], s'est concentré sur les modèles 3D et a étendu leur utilisation dans les structures immersives comme outil de perception pour évaluer le rôle fonctionnel ou symbolique de certains éléments architecturaux et espaces. Vergnien [VT09] a examiné la simulation pour la validation du mouvement et du geste, la cohérence physique et la faisabilité technique des constructions.

Dans ses travaux, Pujol-Tost a également discuté de l'importance de la représentation choisie pour les modèles 3D en réalité virtuelle [PT11]. Selon les nouvelles tendances dans le domaine, Forte [For11], l'un des piliers de l'archéologie virtuelle, propose de remplacer la terminologie relative à *une reconstitution du passé*, par l'expression *Cyber Archéologie* qui s'appuie sur une simulation du passé. La distinction entre la *Cyber Archéologie* et l'*archéologie virtuelle* se justifie par l'emploi répandu du terme archéologie virtuelle dans les applications consacrées à de la simple visualisation. Par conséquent, la Cyber Archéologie rend l'archéologue plus active dans le processus.

Christou et al. [CAL⁺06] ont utilisé une salle immersive combinée à des dispositifs haptiques et un son 3D à des fins pédagogiques dans une exposition muséale, mais aussi comme outil de recherche. Le projet Archave [VFLJ02] intégrait également une salle immersive et proposait aux archéologues des outils pour étudier les sites historiques.

Un autre travail de Forte et al. [FK10] présente un outil où les archéologues collaborent à distance sur des objets virtuels partagés grâce à des avatars réalistes reconstruits à partir de caméras 3D. Leur cadre de réalité virtuelle proposait une boîte à outils de fonctions d'interaction, comprenant la navigation, la mesure, l'éclairage et le dragage. Cependant, en raison de la capture 3D en temps réel et du rendu des utilisateurs, la visualisation a été limitée à une petite résolution d'image (320x240 pixels) pour assurer un rendu relativement fluide (25 FPS).

Le patrimoine immatériel, comme par exemple la danse folklorique, a également été étudié et un outil d'entraînement à la danse en RV a été développé [ACC⁺22].

Ces différents travaux, restés ponctuels, ont toutefois permis d'ouvrir le domaine du patrimoine culturel à la RX. Ainsi, plus récemment, de grands projets de fouilles archéologiques ont intégré des outils de RX pour accompagner le travail des archéologues [LSFK18, AK18]. Ces deux travaux proposent des outils basés XR destinés à aider le travail des archéologues. Le premier travail, s'appuie sur des outils de GIS pour proposer des environnements de fouilles virtuelles centrés sur les études stratigraphiques. Le second propose des environnements multi-utilisateurs, basés sur la manipulations en RV de données issues de numérisation pas scan laser, rendues par nuages de points. Dans les deux

cas, l'approche propose des outils pour l'étude de grands sites de fouille. Ces deux projets illustrent bien l'intérêt des environnements de RX pour l'étude du patrimoine culturel, dans le contexte de fouilles archéologiques.

3.1.2 Défis et méthode

Nous estimons qu'il est possible de généraliser les approches précédentes pour d'autres métiers du patrimoine culturel, tels que par exemple les restaurateurs, les conservateurs, ou les historiens. De plus, au delà de ces travaux sur des grands sites exceptionnels, il nous semble important de prendre en considération dans le même cadre, différentes échelles d'étude, du simple objet, au site complet, en passant par des bâtiments, ainsi que différents types de sources d'étude, comme par exemple, des documents historiques, des prélèvements géologiques, ou des traditions intangibles. Enfin, dans le cadre d'un travail de recherche inter-disciplinaire, nous revendiquons l'importance de considérer des contributions innovantes pour les différentes disciplines impliquées pour éviter les pièges d'une relation fournisseur de technologie et fournisseur de cas d'usage.

La RX et le patrimoine culturel peuvent s'enrichir mutuellement via des questions telles que :

1. Comment la RX, considérée dans son ensemble, de la science et de la technologie aux sciences humaines, peut-elle bénéficier à l'étude du patrimoine culturel ?
2. Quels sont les défis spécifiques posés par le patrimoine culturel ?

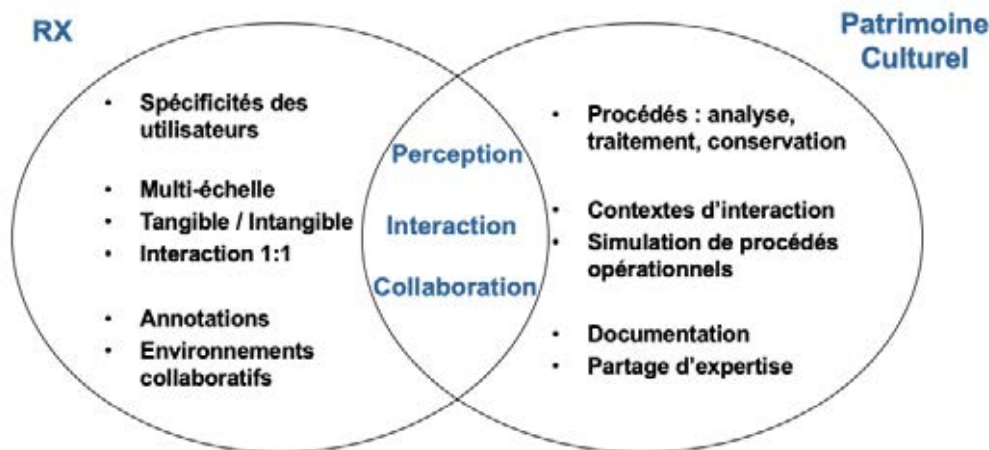


FIG. 3.1 – Les défis réciproques de la RX et du patrimoine culturel

Les défis réciproques sont présentés à la Figure 3.1. Ils s'articulent autour de trois notions clés : la perception, l'interaction et la collaboration. Il est en effet crucial de déterminer la perception pertinente que les experts du patrimoine culturel ont de leur environnement et de leur matériel d'étude, et de proposer des modalités adaptées de perception de la RX, en tenant compte de la spécificité de ces utilisateurs. Pour cela, il faut identifier les processus opérationnels existants, en terme d'analyse, de traitement ou de conservation, afin soit d'améliorer ces processus, soit d'imaginer de nouveaux processus basés sur la RX.

De la même manière, il est également fondamental de comprendre les besoins d'interaction requis par les experts du patrimoine culturel, d'identifier les contextes d'interaction à prendre en compte et de déterminer les objectifs de cette interaction.

L'interaction 1:1 (c'est-à-dire des environnements virtuels représentés à leur échelle réelle) est importante. Elle permet à des experts du patrimoine culturel d'évaluer, par exemple, le rôle symbolique ou culturel des bâtiments architecturaux [GGD⁺14]. Mais il peut aussi être intéressant d'envisager différentes échelles d'interaction, et même le multi-échelles. Par exemple, dans le cas d'un site de fouilles, il est nécessaire de gérer l'échelle de l'ensemble du site, qui peut être très grand, et l'échelle des artefacts découverts sur le site.

Selon le contexte, les interactions tangibles et intangibles doivent être envisagées, par exemple pour permettre une interaction physique avec un artefact [NGT⁺15], ou pour représenter les activités humaines dans un contexte de patrimoine intangible [LCG⁺13].

Enfin, les experts du patrimoine culturel doivent collaborer et partager leurs connaissances, qui sont liées aux environnements virtuels collaboratifs [For11] et à l'enrichissement de l'environnement avec annotations [BKY⁺17].

De plus, des experts du patrimoine culturel peuvent être mis en situation pour valider des activités spécifiques, allant des déplacements au sein des environnements à des interactions plus complexes pour évaluer la faisabilité ou la cohérence d'une tâche.

Dans le cadre d'un processus scientifique, la reconstitution historique ou archéologique en RX devrait fournir un environnement significatif pour les experts du patrimoine culturel, ce qui correspond aux problèmes scientifiques suivants :

- La représentation de l'univers historique est-elle crédible pour les experts du patrimoine culturel ? Photo-réalisme et crédibilité objective sont des objectifs souvent diamétralement opposés. La crédibilité objective est une qualité intrinsèque de la reconstitution selon la perception de l'expert. Tout comme une radiographie a une crédibilité fonctionnelle pour un médecin, les modèles et les environnements des experts en patrimoine culturel virtuel doivent être conçus pour assurer cette crédibilité. Comme Hermon et Nikodem ont développé [HN07], la modélisation 3D ne peut être utilisée pour l'archéologie que dans les conditions de transparence des données et d'évaluation de la précision de la reconstruction.
- Les experts du patrimoine culturel sont-ils capables d'évaluer des hypothèses dans la reconstitution virtuelle ? Au-delà de la crédibilité de la reconstitution, la capacité d'un expert à acquérir de nouvelles connaissances dans un contexte RX est une préoccupation majeure pour une approche scientifique.

Afin de permettre aux experts du patrimoine culturel de comprendre les fonctionnalités des espaces de vie, des activités sociales et des interactions, une simulation RX dédiée au patrimoine doit avoir la capacité (i) de mettre l'univers historique dans un état fonctionnel, et (ii) de mettre les experts du patrimoine culturel dans des situations pour évaluer les actions et interactions des populations. Ces deux questions combinent la cohérence de la reconstitution et la crédibilité de la simulation.

Pour répondre à ces questions, nous avons proposé une méthodologie générale qui part du matériel en contexte et vise des usages innovants pour les experts du patrimoine culturel. Cette méthodologie s'appuie d'une part sur les questions scientifiques soulevées conjointement par l'expert en RX et l'expert métier du patrimoine culturel et d'autre part intègre l'implication de l'expert métier tout au long du processus.

La Figure 3.2 présente les différentes étapes de notre méthodologie [NGT⁺16b, GNB⁺17]. Dans cette méthodologie, à partir des éléments d'étude du patrimoine culturel (qui peuvent être des artefacts, des monuments, des sites de fouilles, des documents écrits, des peintures, des croquis, etc.), la première étape consiste à produire des données 3D (Section 3.1.3), soit par modélisation 3D, soit par numérisation. Ces données sont alors utilisées soit dans une application de RX, soit pour une impression 3D, potentiellement elle-même utilisée comme objet tangible dans une application de RX. Enfin, ces applications de RX sont utilisées ou évaluées par un expert du patrimoine culturel dans le cadre de son métier.

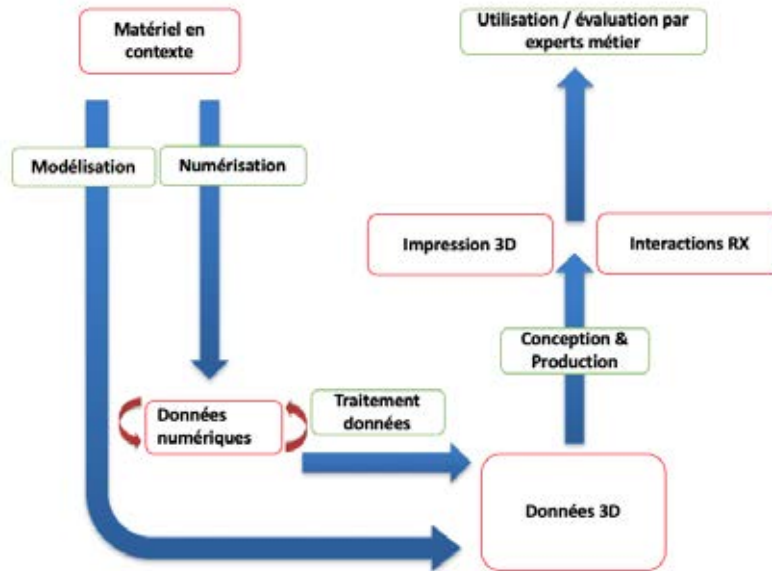


FIG. 3.2 – Méthodologie générale

3.1.3 Production 3D

La production d'environnements 3D pour le patrimoine culturel est une étape importante et implique une décomposition méthodologique qui doit être adaptée au large éventail de questions soulevées par les professionnels de cette communauté. Un élément du patrimoine culturel peut être d'abord numérisé, puis virtuellement restauré, comme il l'était potentiellement, à telle ou telle époque ou bien il est possible d'ajouter de l'information supplémentaire ou des niveaux d'hypothèses. Les différentes étapes du processus de production en 3D sont principalement basées sur deux approches, (i) la numérisation 3D qui repose sur la production de données 3D à partir de matériel réel, et (ii) la conception graphique qui correspond à la production de données 3D par modélisation 3D. Ces deux approches peuvent être également hybridées, ce qui est souvent nécessaire pour prendre en compte les données à disposition, les assembler selon le rendu souhaité.

Numérisation 3D

La numérisation d'objets ou site du patrimoine culturel peut être effectuée par exemple par des techniques de photogrammétrie (à partir de photos), de scan 3D (à partir de nuages de points), ou de scanner à rayon X (tomodensitométrie ou μ -tomographie).

La photogrammétrie et le scan 3D sont des techniques de numérisations très répandues dans le domaine du patrimoine culturel. L'utilisation des scanners à rayon X est assez

récente. La tomographie et la μ -tomographie, basées sur les rayons X, permettent notamment l'étude de la structure interne des objets du patrimoine culturel [AA05]. Ces technologies proviennent du domaine de la médecine. La tomographie μ permet de travailler à petite échelle, allant du submillimètre à quelques centimètres, et avec une résolution spatiale de quelques microns. Ces techniques sont très intéressantes car non destructives au sens où elles peuvent éviter de détruire un objet pour en étudier l'intérieur. Cependant leur utilisation est limitée à la taille du tunnel du scanner.

L'ensemble des images obtenues à partir de cette reconstruction tomographique est utilisé pour la reconstruction 3D. Ce post-traitement vise à mettre en évidence les différents composants du matériau, basés sur l'information de densité calculée lors du scanner, appelée radiodensité, et exprimée par rapport à l'échelle de Hounsfield [Hou73]). Il est également possible de réaliser des segmentations. Ce post-traitement permet d'isoler des portions de données afin de se concentrer sur les parties pertinentes. Cette technique est particulièrement importante pour étudier les artefacts imbriqués.

Nous avons également étudié l'utilisation d'autres techniques de numérisation comme le *Reflectance Transformation Imaging* (RTI), la microscopie numérique 3D, ou encore la capture de mouvement par caméra infrarouge dans le cas de numérisation d'activité humaine. La numérisation peut également porter sur des sons, par exemple dans le cas d'études liées à des instruments de musique.

Modélisation 3D

Distincte de la numérisation 3D, la modélisation 3D de l'hypothétique est une technique manuelle d'infographie qui crée un objet en trois dimensions à l'aide de logiciels dédiés (comme par exemple Blender, CATIA ou Maya). Elle conduit à une implication beaucoup plus importante des experts du patrimoine dans le sens où leur savoir est la matière première du processus de reconstitution.

Une grande majorité des restitutions du patrimoine culturel concerne l'architecture. Par exemple, Vergnien synthétise les usages patrimoniaux des restitutions architecturales 3D en archéologie [Ver11]. Il explique leur engouement par l'immédiateté de l'impact visuel qu'elles génèrent, ce qui facilite grandement la valorisation du patrimoine culturel en nourrissant l'imaginaire collectif. Contraintes par des enjeux narratifs et ludiques, ces images, dont le photoréalisme peut parfois figer l'information dans l'esprit des gens, peuvent néanmoins véhiculer des incertitudes, des fausses informations, des anachronismes et des approximations de détails.

Contrairement aux modèles 3D à des fins d'illustration, pour un contexte scientifique, l'idée est d'inclure toutes les unités structurelles des bâtiments qui la composent. Le lecteur de l'image doit également être capable d'identifier les incertitudes (par exemple, dans la Fig. 3.3, la texture porte l'information visuelle de comparaison), la ou les phases chronologiques choisies, la version et les sources documentaires. Plus récemment, si le respect et la gestion des sources documentaires semblent être appliquée [Gos14], la manière dont les contraintes, les choix et les points de vue de restitution influencent et modifient le rapport aux données et aux sources, soulèvent donc des questions [Hug15].

3.2 Structuration en axes d'étude

Comme nous l'avons mentionné, de nombreux projets de patrimoine culturel ne vont pas au-delà de l'étape de production d'un environnement virtuel 3D. Même si cela peut être légitime en cas d'illustration ou de médiation scientifique, nous considérerons ces données

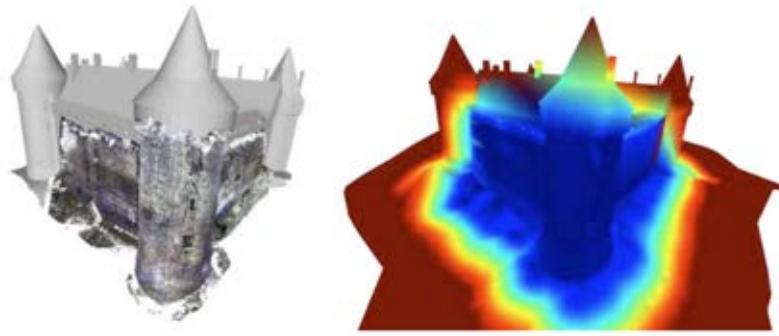


FIG. 3.3 – *Assemblage nuage/modélisation et modélisation texturée du château de Coatfrec (à gauche) avec dégradé de couleurs illustrant les distances avec le nuage de points (à droite, le bleu représente la distance la plus petite) [BBP⁺ 14]*

comme une étape intermédiaire pour laquelle il est possible de concevoir et de produire des contenus et des applications de RX qui peuvent être utilisées, évaluées ou partagées par des experts du patrimoine culturel.

Afin de structurer les cas d'études, nous proposons une approche scientifique articulée autour d'axes transversaux d'utilisation, Voir (visualisation de la structure externe de l'artefact, Section 3.2.1), Révéler (visualisation de la structure interne de l'artefact, Section 3.2.2), Manipuler (interaction avec l'artefact, Section 3.2.3), et Partager (interaction avec l'application, Section 3.2.4). Cette structuration en axes d'études peut se comparer aux niveaux d'interaction définis par Bowman [BJH99]. Pour le premier niveau d'interaction qu'il propose, la navigation, nous avons distingué deux niveaux, les axes Voir et Révéler, afin de répondre à une spécificité du domaine. Nous présentons plusieurs exemples pour illustrer chaque axe d'étude avec différents contextes d'utilisation ou d'évaluation.

3.2.1 Axe Voir

L'axe *Voir* porte sur les modalités de visualisation du matériel ou du contexte archéologique concernant sa structure externe. Nous nous attachons à identifier des modalités de visualisation adaptées à différents cas d'étude qui permettent d'étudier un objet ou son contexte pour sa structure externe.

La production des données repose sur des technologies de numérisation de surface telles que la photogrammétrie ou le scan laser, ainsi que sur la modélisation 3D. En terme d'interaction, le premier niveau, la navigation peut être utilisée pour cet axe. Nous montrons un exemple représentatif de cet axe avec le site de Rémire et nous proposons par la suite d'autres travaux en lien avec cet axe.

Axe voir : le site de Rémire

Le site de Rémire est une ancienne plantation de canne à sucre gérée par les jésuites aux XVIIe et XVIIIe siècles à Loyola, en Guyane française. Pour ce site, étudié par une équipe d'archéologues de l'Université Laval à Québec, nous nous sommes efforcés de simuler son lien avec le milieu naturel [BPB⁺15]. l'objectif de cette reconstitution était de permettre aux archéologues de s'immerger de manière convaincante dans le site afin de mieux comprendre son organisation et son fonctionnement. Les différents bâtiments du site, la végétation et sa topologie (ie. l'organisation des différentes zones de plantations,

le placement des bâtiments, et les chemins entre les différentes zones du site) ont été modélisés par le CNPAO [BGB⁺13] (Fig. 3.4). Une attention particulière a été accordée à la reconstitution de la végétation du site, avec la modélisation d'arbres et de plantes représentatifs de cette zone de la Guyane. Nous avons reconstitué la course du soleil, de la lune et de la voûte céleste, pour un jour donné correspondant à l'époque reconstituée, avec la représentation des ombres et de l'éclairage (Fig. 3.4, centre). Nous avons également simulé en fonction de l'heure de la journée, l'environnement sonore composé de chants d'animaux (grenouilles, oiseaux) par zone en fonction de l'environnement végétal (Fig. 3.4, en haut, à droite).

L'utilisateur immergé peut effectuer quelques interactions avec l'environnement général, il peut modifier l'échelle de temps pour observer facilement différents moments de la journée (Fig. 3.4, en bas). pour ce travail, nous nous sommes attachés à proposer une simulation qui contienne des éléments virtuels et sonores cohérents pour la perception des archéologues grâce à la production d'un contexte naturel de l'ensemble du site.

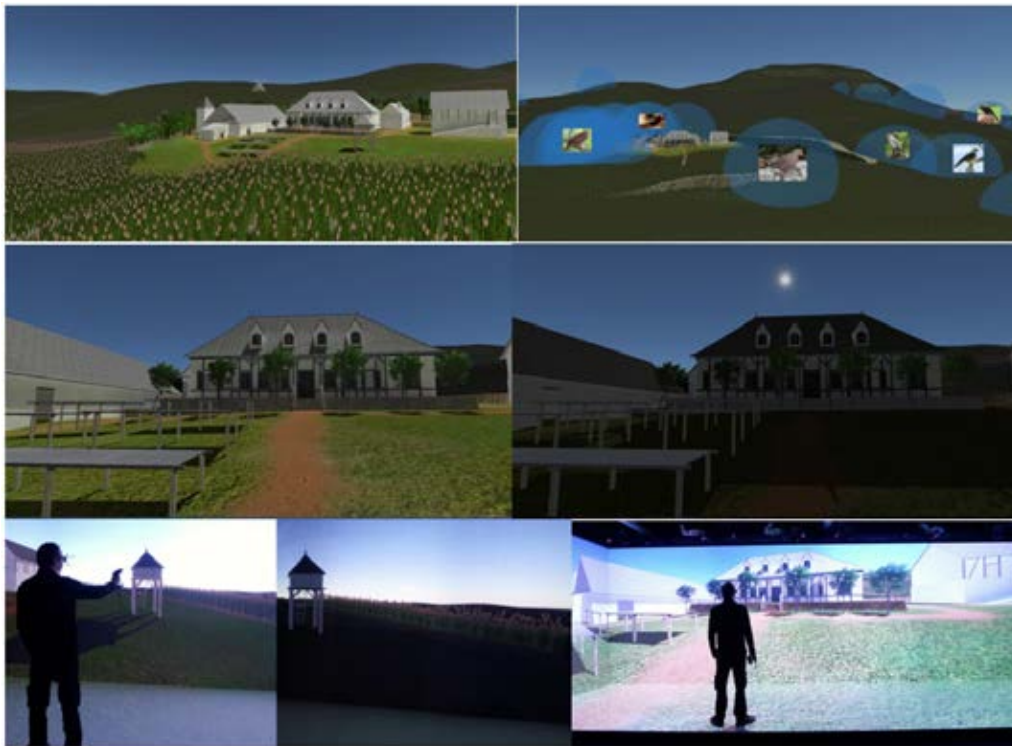


FIG. 3.4 – *Modèle 3D du site (en haut, à gauche), simulation sonore de l'environnement naturel du site (en haut, à droite), simulation du parcours de nuit et de jour (au centre) et interaction fonctionnelle en réalité virtuelle (en bas) [BPB⁺15]*

Ce travail a été réalisé en collaboration avec le CNPAO, l'UMR CReAAH, l'Université de Laval, Québec.

Axe Voir : autres travaux

Les méthodologies de visualisation proposées dans le cadre de nos recherches ont suscité un réel intérêt dans la communauté des archéologues. Nous avons ainsi été amenés à travailler sur un nombre significatif d'artefacts, de bâtiments ou de sites archéologiques,

Travaux	Production des données numériques 3D.	Mode visualisation	Résultats
Fragments de vases [BNB ⁺ 14a, BNB ⁺ 14b]	Photogrammétrie, modélisation	Impression 3D, desktop et réel	Génération et production d'un support par modélisation et impression 3D pour un vase fragmenté
Château médiéval partiellement en ruine, Coatfret (22) [BBP ⁺ 14]	Scan 3D et modélisation	Desktop, avec superposition des modèles 3D	Production de métriques d'estimation de niveau de conservation du bâtiment par comparaison numérisation et modélisation
Cairns, Bretagne [GBCG12, CBP ⁺ 17]	Photogrammétrie, scan 3D, modélisation	RV 1:1 avec combinaison des différents modèles 3D: 3D texturée pour les données photogrammétrie et scan laser, maillage surfacique pour les modélisations	Approche d'étude du bâti appliquée à des constructions néolithiques par combinaison de numérisation et modélisation et visualisation 1:1 en RV
Villa Gallo-romaine, Bais [GLCBG13]	Modélisation	RV 1:1 du site complet	Validation de la reconstitution architecturale, étude des expressions de pouvoir et de la présence religieuse
Épave ensablée en estran, Erquy (22) [HJB ⁺ 15]	Photogrammétrie, scan 3D	RV 1/1 avec modèle 3D texturé pour photogrammétrie et scanner, et nuage de point pour scanner	Comparaison de méthodes de numérisation en estran (contraintes de marées) et restitution en RV
Site de plantation sucrière de Remire, Guyanne française [BPB ⁺ 15]	Modélisation	RV 1:1 de l'ensemble du site intégrée à la topographie 3D de la zone géographique	Reconstitution et étude de l'environnement naturel du site (course du soleil, végétation, sons d'animaux localisés en fonction de la végétation et de l'heure de la journée)
Palais de l'Intendant, Québec [PNG ⁺ 19]	Modélisation	RV 1:1 de l'ensemble du site intégrée à la topographie 3D de la zone géographique	Approche phénoménologique pour l'étude du site en environnement virtuel immersif.

TAB. 3.1 – Études de cas de l'axe Voir

de natures différentes, sur des périodes chronologiques variées (Paléolithique, Mésolithique, Âge du Fer et Médiévale). Le tableau 3.1 reprend quelques-uns des travaux réalisés avec leurs spécificités. Ils sont issus de collaborations avec des experts métier du domaine du patrimoine culturel.

3.2.2 Axe Révéler

L'axe *Révéler* traite de la visualisation des structures internes du matériel du patrimoine culturel. Le problème consiste à identifier ou à concevoir des processus de production pour les données à visualiser ainsi que des modalités de visualisation de ces données. La production des données repose sur des technologies de numérisation de la détection de la composition interne, principalement à l'aide de techniques d'imagerie médicale telles que le scanner à rayon X (essentiellement tomodesitométrie). Tout comme pour l'axe Voir, l'interaction de base est la navigation. Nous montrons un exemple représentatif de cet axe avec la tombe à char de Warcq et nous listons par la suite d'autres travaux en lien avec cet axe.

Axe révéler : tombe à char de Warcq

Dans le cadre d'une étude archéologique préventive dans la commune de Warcq (Ardenes, région Grand Est), une tombe gauloise aristocratique (datant du milieu du IIe siècle avant J.-C.) a été découverte et fouillée par l'Inrap. Les vestiges découverts dans la tombe se sont révélés exceptionnels. La vaste chambre funéraire (5,50 x 2,80 m) a été conservée à une profondeur de plus d'un mètre. Dans cet environnement humide, les murs et le plafond en bois ont été extrêmement bien conservés. Avec le temps, ce dernier s'était effondré directement sur le sol de la chambre, recouvrant le défunt et ses biens. Les artefacts funéraires découverts étaient d'une qualité inhabituelle. L'objet principal était un char de cérémonie à deux roues. L'un des éléments les plus spectaculaires était l'enterrement en plus du défunt de quatre chevaux autour du char. Le défunt, très probablement un homme, était couché sur le char.

Nous avons suivi la méthodologie générale (Fig. 3.5) qui part du matériel archéologique et allant jusqu'à une impression 3D et une application de RV. Plusieurs relevés photogrammétriques de l'ensemble du site ont été effectués durant différentes étapes de la fouille. Comme le sol de la tombe était très humide, il a été décidé de prélever des blocs complets autour de certains éléments d'intérêt qui nécessitaient un processus de fouille très prudent [NGT+17, NGT+18]. Sept blocs ont été scannés afin de préparer leur micro-fouille et la restauration des artefacts contenus dans ces blocs. Le bloc S1 contient le moyeu de la roue, les blocs S2 et S3 contiennent deux seaux, le bloc S4 contient la jante d'une roue, les blocs S5 et S6 contiennent les têtes harnachées des deux chevaux en avant du char et le bloc S7 contient un joug.

Les données générées par la tomodesitométrie ont été traitées afin d'effectuer des études préliminaires avec une segmentation, une génération de rendus volumiques et surfaciques. Les données de tomodesitométrie (coupes, reconstruction 3D) ont guidé toutes les étapes de la micro-fouille. Ces opérations ont été réalisées en collaboration avec l'archéologue responsable du site et un restaurateur. L'ensemble du processus de micro fouille a également été documenté par photogrammétrie. Tous les échantillons ont suivi le même processus : la micro-recherche, guidée par les données du scanner, sous une loupe, suivie d'un nettoyage pour l'étude par micro-sablage sous une loupe binoculaire (Fig. 3.6).

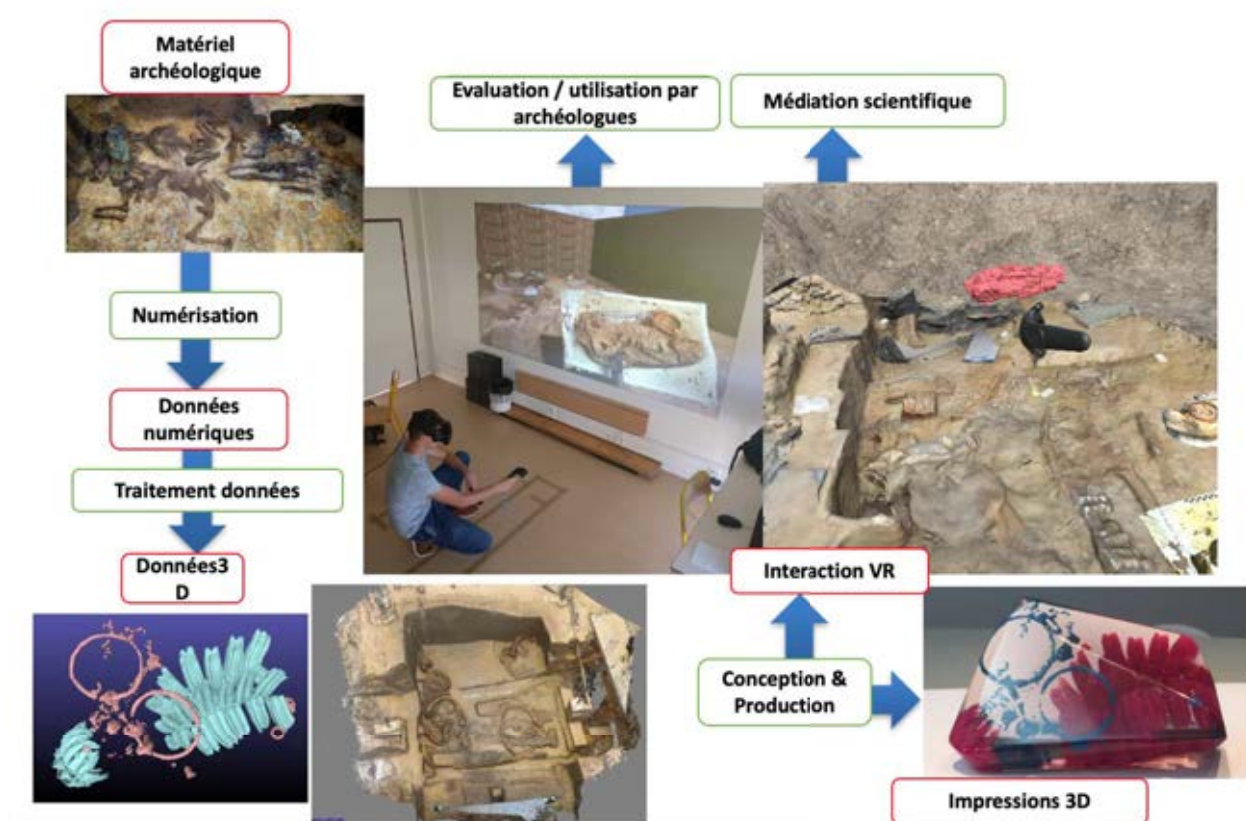


FIG. 3.5 – Étude de cas de la tombe aristocratique gauloise de Warcq

Ce procédé a été particulièrement efficace pour l'étude des deux têtes de chevaux encore attelées où il a permis aux chercheurs d'observer, de quantifier et de localiser la présence d'objets à l'intérieur des échantillons en amont de l'intervention, malgré le mauvais état de conservation. L'exemple le plus important est la décoration du harnais. Ces éléments visibles sur les images du scanner sont très petits. Ils étaient composés de très fines feuilles d'alliage de cuivre qui recouvraient à l'origine les têtes de clous. Ils n'ont pas tous été trouvés lors de la micro fouille en raison de leur taille, du sédiment très complexe à fouiller et de leur état de conservation. L'imagerie et les observations directes sur la microstructure ont permis de restaurer les différents éléments du harnais.

Nous avons utilisé le rendu de surface 3D pour générer des maillages 3D correspondant à différentes plages de densité afin de produire une impression 3D qui met en évidence l'organisation spatiale des parties métalliques du harnais (Fig. 3.5 en bas à gauche). Nous avons choisi d'utiliser une technique d'impression transparente du bloc, avec des couleurs différentes pour les éléments internes (Fig. 3.5 en bas à droite, en rose la dentition et en bleu le métal). L'impression 3D transparente constitue un enregistrement spatial tangible de la tête du cheval, avec les dents visibles. Elle offre une meilleure visualisation et perception du volume de spatialisation et de la relation entre les objets. La tête elle-même n'a pas pu être restaurée en dehors des dents, car il n'y a plus de matière osseuse. L'impression 3D a donc un objectif de sauvegarde à long terme.

Les données numériques des différents échantillons ont été intégrées dans une restitution complète de plusieurs étapes de la fouille de la tombe complète, en RV (par exemple, casque de RV, Fig. 3.5). Les données issues de photogrammétrie et tomodensitométrie ont

FIG. 3.6 – *Micro-fouille d'un bloc en laboratoire*

été intégrées dans la reconstitution et manipulables par l'utilisateur avec la possibilité de passer d'une vue à l'autre. De plus, plusieurs outils d'interactions opérationnelles tels que la mesure de distances, une loupe et la visualisation des objets par rayons X sont proposés à l'utilisateur.

Les archéologues en charge de la fouille ont essayé la reconstitution virtuelle. Le premier commentaire a été qu'ils n'avaient jamais eu une vue complète de la tombe pendant la fouille à cause de la présence d'échafaudages. Cette vue complète leur a donné une nouvelle perspective de l'organisation de la tombe.

Dans ce travail, la tomodensitométrie et l'impression 3D sont des outils dans une chaîne d'analyse qui implique différents experts. La réalité virtuelle offre différentes vues du site, correspondant à différentes étapes de la fouille et une vue complète de la tombe qui permettent aux archéologues de réaliser des observations qui étaient impossibles dans la tombe réelle. Ils ont également souligné l'intérêt pour une médiation scientifique. La méthodologie ouvre de nouvelles perspectives pour appréhender un site et son processus de fouille.

Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'[Inrap](#), l'[UMR Trajectoires](#) et l'entreprise [ImageET](#).

Axe révéler : autres travaux

L'utilisation de la tomodensitométrie pour la numérisation d'artefacts et plus généralement de matériel archéologique nous a permis d'accéder de manière non destructive à des informations sur leur structure interne. Ces données soulèvent des problématiques de visualisation particulières en RX, notamment liée à la perception de profondeur pour la représentation de ces structures internes. Dans le cas d'étude précédent (la tombe gauloise de Warcq), nous avons proposé deux modes de visualisations, une première basée sur la gestion de la transparence de maillages imbriqués dans l'environnement de RV, et une seconde basée sur une impression 3D transparente. Nous avons proposé et étudié d'autres modes de visualisation de la structure interne de matériel archéologique, comme par exemple la superposition de masques [OKM15] sur la surface du matériel archéologique réel en réalité augmentée afin d'améliorer la perception de profondeur à l'intérieur du matériel [GPOG19], la projection d'éléments interne sur une impression 3D en réalité augmentée spatiale [GPN⁺18], le rendu de données volumiques par nuages de points [DGNG21], ou

Travaux	Production des données numériques 3D.	Mode visualisation	Résultats
Urne de crémation de Guipry (35) [NGT ⁺ 16a] [GPOG19]	Tomodensitométrie	Impression 3D transparente, réalité mixte	Visualisation complète de la structure interne de l'urne [NGT ⁺ 16a]. Évaluation de métaphores de visualisation interne [GPOG19].
Outils de maréchal-ferrant [NGG17]	Tomodensitométrie	Impression 3D transparente	Visualisation des différents outils inclus dans une gangue de corrosion sans recours à un processus de restauration coûteux
Vertèbres humaines dans un dépôt cinéraire [NGT ⁺ 15]	Tomodensitométrie	Impression 3D	Reconstitution de 3 vertèbres uniquement à partir de leur empreinte dans du sédiment à l'intérieur d'une urne funéraire
Étude du plus vieil os humain breton (clavicule du Mésolithique) [BGG ⁺ 17a][BGG ⁺ 22]	Tomodensitométrie, μ tomodensitométrie, microscopie numérique	Desktop, impressions 3D à différentes échelles	Étude par tracéologie de la clavicule sur les données numériques 3D pour identification de traitements post-mortem [BGG ⁺ 22]
Tombe à char de Warcq [NGT ⁺ 17, NGT ⁺ 18]	Tomodensitométrie, photogrammétrie	Réalité virtuelle, impression 3D transparente, reconstitution en réalité virtuelle du site de fouille	Représentation spatiale d'éléments décoratifs métalliques du harnachement d'une tête de cheval non retrouvés dans la fouille réelle
Momie de chat [GPN ⁺ 18]	Tomodensitométrie, photogrammétrie	Impression 3D transparente, réalité augmentée spatiale, réalité mixte OST (Optical see-through), réalité virtuelle	Étude de plusieurs modalités de visualisation de l'intérieur de la momie pour une présentation en musée. L'impression 3D transparente est exposée dans le musée à titre permanent.

TAB. 3.2 – Études de cas de l'axe Révéler

encore différentes modalités de visualisation de l'intérieur d'une momie de chat [GPN⁺18] (ce dernier cas est détaillé en Section 3.4.3). Le tableau 3.2 propose une synthèse de différents travaux réalisés sur l'axe Révéler.

3.2.3 Axe Manipuler

L'axe *Manipuler* traite de l'interaction entre l'utilisateur et l'objet, que cette interaction soit purement virtuelle ou tangible. L'objectif est de proposer de nouvelles métaphores d'interaction, basées sur les méthodes et les outils de la RX qui répondent aux spécificités du domaine du patrimoine culturel. Il est important que ces interactions soient aussi naturelles que possible afin que la technologie s'efface derrière son utilisation, et qu'elles s'intègrent dans les processus opérationnels des experts du domaine. Nous montrons un exemple représentatif de cet axe avec le poids d'Ossé et nous listons par la suite d'autres travaux en lien avec cet axe.

Axe Manipuler : le poids d'Ossé

Le poids en granit d'Ossé (La Claisserie, Ille et Vilaine) a été découvert dans un gisement d'objets métalliques d'une ferme datant du 2e-1e siècle avant notre ère, dans le cadre de fouilles préventives menées par l'Inrap.

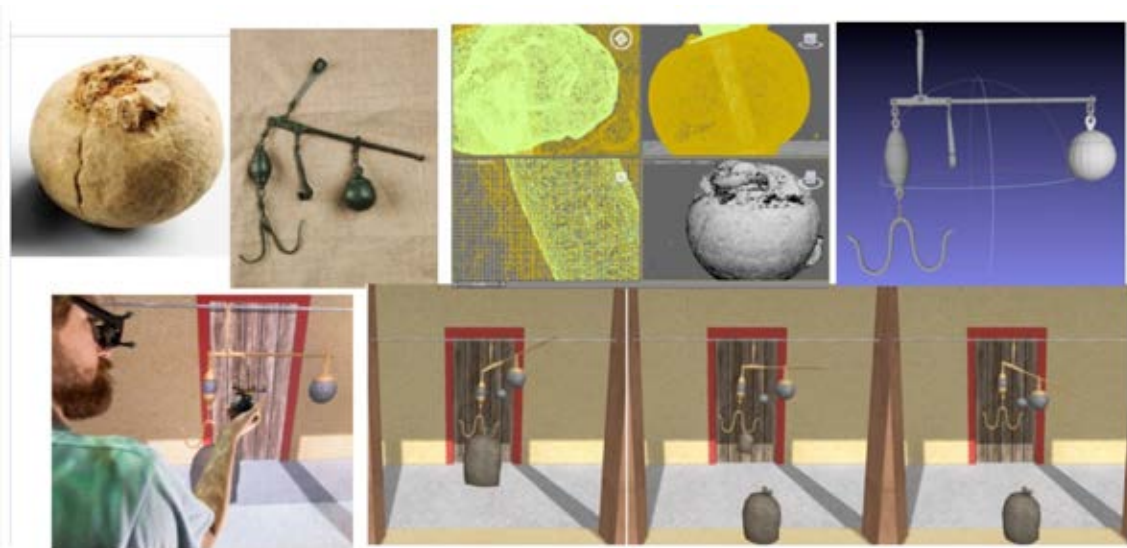


FIG. 3.7 – Poids réel et balance (en haut, à gauche), numérisation et modélisation (en haut, au centre et à droite), interaction fonctionnelle dans un contexte historique, en réalité virtuelle (en bas) [NGT⁺15]

Pour mieux montrer l'utilisation de ce poids, nous avons proposé une application de RV à laquelle est ajouté un contexte avec une modélisation d'une balance, basée sur des fragments trouvés sur le même site et sur une balance complète trouvée sur un autre site similaire [NGT⁺15] (vidéo¹) (Fig. 3.7). Nous avons implémenté une simulation du comportement physique des différents éléments de la balance, dans un environnement virtuel représentant un site de la même époque. De plus, nous avons utilisé une copie du poids imprimé en 3D comme objet tangible pour interagir dans la simulation en réalité virtuelle.

1. <https://www.youtube.com/watch?v=LtWvolQHqY0t=34s>

FIG. 3.8 – *Impression 3D démontable du poids*

L'utilisateur immergé dans l'univers virtuel peut alors peser des objets en utilisant la balance. Grâce à un système de capture de position par caméra infrarouge, cet objet est reconnu et suivi dans l'environnement et l'utilisateur peut utiliser ce poids en interaction avec la balance en pesant des objets virtuels.

Nous avons également réalisé une impression 3D démontable de l'objet en séparant l'axe métallique de la sphère en granit (Fig. 3.8). Cette impression 3D a permis aux archéologues d'identifier la technique de forge utilisée pour la fabrication de l'axe ainsi que la manière dont l'axe a été embouti dans la sphère de granit. Sans cette impression, cette analyse n'aurait pas été possible sans détruire l'artefact. Les archéologues n'avaient pas pu non plus arriver à cette conclusion par la seule observation des images 3D.

Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'[Inrap](#), l'[UMR Trajectoires](#) et l'entreprise [ImageET](#).

Axe Manipuler : autres travaux

Les possibilités d'interaction en RX offrent des possibilités extrêmement riches pour les métiers du domaine du patrimoine culturel. Il est possible d'utiliser des interactions pour un contexte de mise en fonction de sites, bâtiments, ou objets. Nous avons ainsi proposé des simulations interactives de reconstitutions d'un navire du 18e siècle [[BNG⁺15](#), [BGO⁺20](#)] et d'un instrument de mesure acoustique du 19ème siècle [[GNP⁺21](#)]. Nous avons également utilisé des environnements de RX associés à des interactions virtuelles ou physiques, à travers des impressions 3D, pour accéder à des éléments de patrimoine intangible comme de la musique [[SBG⁺16](#), [GLJF⁺20](#)] ou différentes activités humaines [[GSN⁺18](#)]. Le tableau 3.3 présente une synthèse de différents travaux réalisés sur l'axe Manipuler.

3.2.4 Axe Partager

L'axe *Partager* couvre la documentation, le partage et l'archivage des données numériques. Son objectif est double : (i) travailler sur l'enrichissement de l'objet au niveau numérique, par l'intégration de méta-données associées aux données 3D et/ou l'ajout d'informations spatialisées au sein des données 3D ; (ii) permettre au chercheur de croiser les informations sur les corpus numériques. Ces informations peuvent également être partagées dans le cadre de sessions de travail collaboratives synchrones ou asynchrones, localement ou à distance.

Travaux	Production des données numériques 3D	Mode visualisation	Résultats
Flûtes en os [SBG ⁺ 16]	µ-Tomodensitométrie	Impression 3D jouable	Étude de l'acoustique pour différentes techniques d'impression 3D et comparaison avec une approche artisanale
Poids gaulois [NGT ⁺ 15]	Tomodensitométrie	Impression 3D démontable, RV avec interface tangible par impression 3D	Étude non destructive de la technique de fabrication du poids Mise en contexte d'utilisation du poids, en RV
Urne de Saltdean (Brighton, Grande-Bretagne) [GSN ⁺ 18]	Photogrammétrie, modélisation 3D	RV 1:1, interaction avec une copie imprimée en 3D de l'urne	Interaction avec différents contextes d'interprétation de l'urne (fabrication, utilisation domestique, utilisation funéraire), dans une reconstitution d'un village contemporain à l'urne
Navire de la Compagnie des Indes, Le Boullongne [BNG ⁺ 15][BGO ⁺ 20]	Modélisation 3D, capture de mouvement	RV 1:1 simulation de navigation, et reconstitution d'activités humaines à bord	Étude de l'organisation de la vie à bord par des historiens, présentation pour des actions de médiation scientifique
Tablette gravée du 15e siècle [GLJF ⁺ 20]	RTI, photogrammétrie, microscopie numérique, enregistrement sonore	Application 3D interactive avec la copie numérique de la tablette, sur tablette tactile ou web	Présentation de l'étude des gravures sur la tablette dont une partition musicale, interaction sonore avec la partition, dans un objectif de médiation scientifique.
Sirène de Cagniard de la Tour [GNP ⁺ 21]	Tomodensitométrie, photogrammétrie, modélisation CAO	RV 1:1	Simulation interactive du fonctionnement de la sirène, instrument de mesure acoustique, avec reproduction de l'expérience de mesure.

TAB. 3.3 – Études de cas de l'axe Manipuler

Nous montrons un exemple représentatif de cet axe avec deux outils de manipulation de nuages de points (scan 3D et tomodensitométrie) destinés à l'enrichissement de la documentation produite par les archéologues et nous listons par la suite d'autres travaux en lien avec cet axe.

Axe Partager : nuages de points

Le nuage de points constitue la donnée brute obtenue par scan laser et est la représentation la plus fidèle de la zone numérisée. En effet, les processus de génération de surface peuvent induire des erreurs. Ces données obtenues sont généralement transformées en un maillage à l'aide d'algorithmes de reconstitution géométrique pour être exploitées en 3D. Il constitue en soi un ensemble de données 3D qui peut être exploité de manière pertinente en RX. Cette représentation sous forme de points est peu utilisée jusqu'à présent, car elle est complexe à mettre en œuvre dans une application interactive, notamment parce qu'elle ne bénéficie pas des techniques d'optimisation graphique largement développées en infographie sur le rendu des polygones.

Nous avons mis en place un certain nombre d'outils qui permettent d'interagir directement avec le nuage de points, en RV (Fig. 3.9). Pour cette étude de cas, nous nous intéressons à la salle du Jeu de Paume de Rennes [BGG17b]. Nous avons proposé à l'utilisateur plusieurs interactions et outils (Fig. 3.9) tels que la navigation, le changement de densité, le LOD (niveaux de détails), la mesure de distances, le plan de coupe avec une tablette, le plan 2D et l'intégration de vues de photos, de croquis et de modèles 3D [GPBG19]. Cet environnement d'étude d'un bâtiment complet, basé sur une visualisation par nuage de points, associé à différentes interactions est destiné à produire des données d'étude pour le rapport de fouille de l'archéologue.



FIG. 3.9 – Visualisation immersive du nuage de points à 1:1 (en haut, à gauche), exemple de vue de coupe 2D obtenue avec l'outil (en haut, à droite), interactions avec le nuage de points en haute définition (en bas, à gauche), manipulation du plan de coupe avec une tablette tactile trackée (en bas, au centre), position d'une vue photographique dans l'application de Réalité virtuelle (en bas, à droite).

Nous nous sommes par la suite intéressés à l'utilisation des représentations par nuages de points pour un autre type de données, les données volumiques. Ce type de données est généralement représenté en RV à l'aide de textures 3D obtenues par *raymarching*. Cependant, cette technique de rendu efficace pour la visualisation n'est pas adaptée à

une interaction de type segmentation qui est une fonctionnalité fondamentale pour les archéologues pour la simulation de micro-fouille.

Nous avons donc proposé un framework avec un ensemble d'outils pour générer et manipuler des nuages de points volumétriques issus de tomodensitométrie dans un environnement de RV [DGNG21]. Le framework offre une application pour la génération des nuages de points à partir des fichiers DICOM, et une application RV. Les principales fonctionnalités de cette application sont un outil de segmentation qui permet d'extraire n'importe quelle collection de points pour une manipulation indépendante (exemple avec une urne de crémation contenant des sédiments, des os et trois bracelets Fig. 3.10), un outil de mise à l'échelle qui permet de se déplacer librement à l'intérieur du nuage de points et la possibilité de traiter des données volumétriques provenant de plusieurs sources en parallèle pour des comparaisons directes.

Ces outils sont conçus pour être facilement utilisables par des experts métier du patrimoine culturel, ce qui a été validé par une pré-étude auprès de sept professeurs en archéologie.

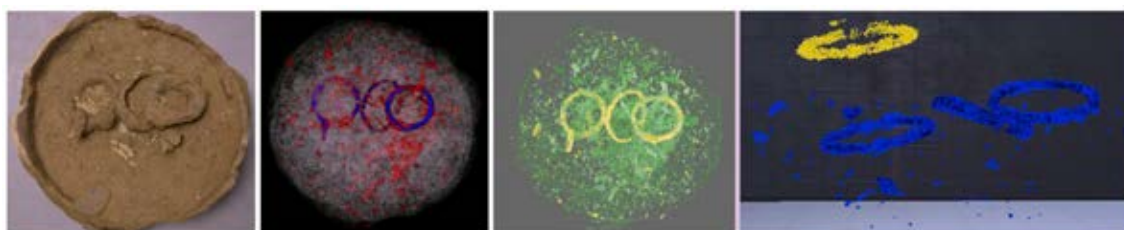


FIG. 3.10 – *Outil de segmentation : a) Urne de crémation ; b) Rendu volumique ; c) Nuage de points des objets métalliques en RV ; d) Nuage de points du bracelet segmenté (jaune)*

Axe Partager : autres travaux

Des interactions directement liées à l'activité métiers du domaine peuvent être proposées afin de s'inscrire dans un processus métier existant ou d'en créer un nouveau. C'est le cas pour les environnements de fouille virtuelle que nous avons proposés, à l'échelle de la micro-fouille [LGG⁺18] ou de la fouille d'un site complet [Léc20, LGG⁺]. Pour ces cas d'usage, nous nous sommes appuyés sur des modèles décrits au chapitre 1, nous détaillons ces travaux dans les Sections 3.4.2 et 3.4.4. Le tableau 3.4 présente une synthèse des différents travaux réalisés sur l'axe Partager.

3.3 Structuration selon les interactions

Nos travaux de recherche dans le domaine du patrimoine culturel nous ont permis d'affiner la représentation des activités dans les applications de RX en nous concentrant sur l'objet de l'interaction proprement dite. Nous avons proposé de distinguer deux familles d'interactions [GG20], les interactions fonctionnelles qui mettent en usage des objets, des monuments ou des sites (Section 3.3.1), et les interactions opérationnelles qui peuvent modifier la représentation d'un objet pour générer des données d'étude (Section 3.3.2).

Travaux	Production des données numériques 3D.	Mode visualisation	Résultats
Fouille avec nuage de points [GPBG19]	Scan 3D	RV 1:1 du bâtiment extérieur et intérieur	Environnement de travail (étude virtuelle et rapport de fouille) avec outils d'interaction avec le nuage de points (changement de densité, LOD, plan de coupe avec tablette, plan 2D), intégration de vues photos, croquis et modèles 3D.
Micro-fouille avec nuage de points (urnes de crémation, sirène de Cagniard, momie de chat) [DGNG21]	Tomodensitométrie	RV avec interactions techniques sur les différents éléments du modèle	Environnement de travail pour générer et manipuler le nuage de points. Outil de segmentation, mise à l'échelle, traitement de données volumiques
Environnement de micro-fouille [LGG ⁺ 18]	Tomodensitométrie	Desktop, workbench RV 1:1 avec interactions techniques sur les différents éléments du modèle	Environnement de micro-fouille virtuelle INSIDE avec utilisation sur des urnes de crémation. Utilisation de #FIVE
site de Beg-er-vil [LGG ⁺ , Léc20].	Photogrammétrie terrestre et par drones, scan 3D, μ Tomodensitométrie, modélisation 3D	RV 1:1 avec interactions techniques sur les différents éléments et données du modèle	Environnement de fouille virtuelle d'un site complet avec données hétérogènes. Utilisation de #FIVE et #SEVEN

TAB. 3.4 – Études de cas de l'axe Partager

3.3.1 Interactions fonctionnelles

Les interactions fonctionnelles sont associées à une simulation du fonctionnement d'un contexte archéologique, qu'il s'agisse d'un site, d'un bâtiment ou d'un objet. Elles permettent à l'utilisateur de mettre ces artefacts en usage dans la simulation.

Nous présentons des exemples d'interactions fonctionnelles mises en œuvre dans le cadre de cas d'études en patrimoine culturel réalisées au cours de différents travaux. Ces exemples sont donnés à titre d'illustration afin de stimuler la réflexion sur l'intérêt de la mise en contexte fonctionnel.

Les travaux sur le poids Ossé [NGT⁺15] (Section 3.2.3) est un exemple d'interaction fonctionnelle. Le poids est utilisé par l'utilisateur en RV dans son contexte d'usage qu'est la balance, elle même représentée dans un bâtiment contemporain de l'objet.

Le site de Rémire [BPB⁺15] (Section 3.2.1) met en interaction fonctionnelle le site par l'intermédiaire d'ajout du contexte naturel avec la course du soleil, la végétation et les animaux. Le contexte est visuel et également sonore. Le son est particulièrement important pour la mise en contexte fonctionnelle d'une simulation d'un site.

Dans l'exemple de la reconstitution en RV d'une Sirène de Cagniard-Latour (un instrument scientifique du 19ème siècle de mesure acoustique) [GNP⁺21], l'utilisateur manipule l'instrument virtuel pour mesurer la fréquence des sons (Fig. 3.11). Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec l'Inrap et le service culturel, collections d'instruments scientifiques anciens et contemporains de l'Université de Rennes 1.



FIG. 3.11 – *Interactions fonctionnelles, Sirène de Cagniard-LaTour à gauche et en RV à droite.*

Un autre exemple est la reconstitution montrant l'urne ou vase de Saltdean (Grande-Bretagne) dans son contexte lors de différentes interactions fonctionnelles comme sa fabrication, une utilisation pour cuisiner et lors de funérailles [GSN⁺18]. Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec le CSIUS (Centre for Secure, Intelligent and Usable Systems, University of Brighton) UK, l'Inrap et l'UMR CReAAH.

Dans le cas d'étude du navire de la compagnie des Indes du 18ème siècle, le Boullongne, nous avons proposé différentes interactions fonctionnelles [BNG⁺15]. Nous avons d'abord travaillé sur la flottaison du bateau avec une simulation de l'eau afin que le bateau bouge de manière cohérente en fonction des mouvements de la surface de la mer. Dans un deuxième temps, nous avons proposé des interactions à l'utilisateur afin qu'il puisse interagir avec les objets constituant le navire. Par exemple, il est possible de faire tourner la barre du bateau avec un comportement physique qui transforme l'angle de la barre en forces qui agissent

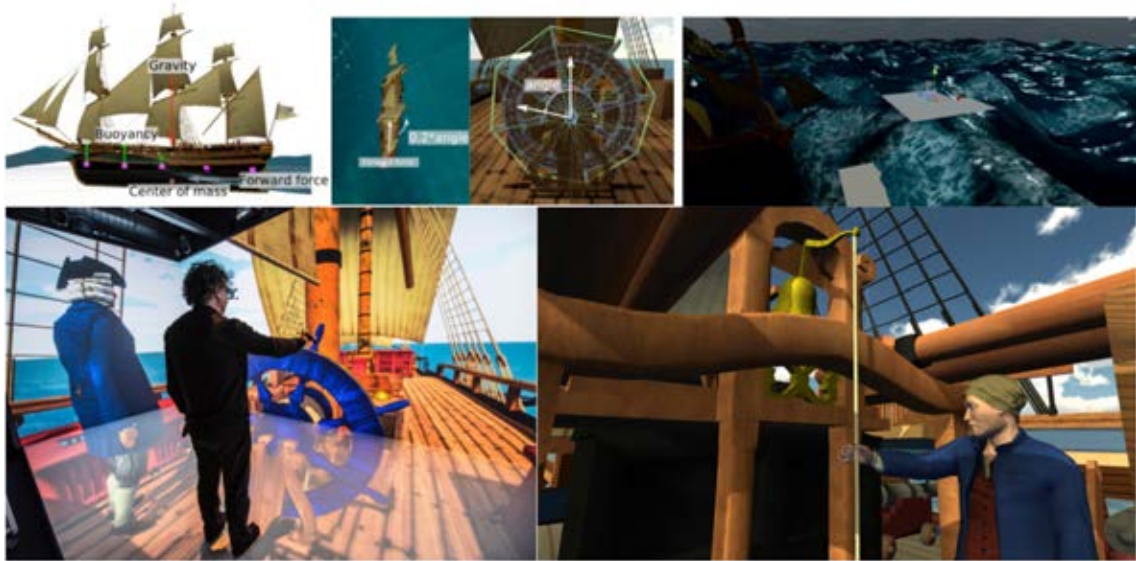


FIG. 3.12 – *Simulation physique de la Boullongne (en haut) et interactions fonctionnelles avec la barre à roue et la cloche (en bas) [BNG⁺15]*

sur le bateau et modifient ainsi sa trajectoire. Nous avons également ajouté la possibilité de faire sonner une cloche ou de tirer au canon. La Figure 3.12 illustre la simulation physique du navire et les interactions fonctionnelles avec la roue et la cloche. Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'UMR TEMOS, l'UMR CReAAH et le CNPAO (Conservatoire numérique du patrimoine archéologique de l'Ouest). Ces travaux sont présentés plus en détail dans la section 3.4.1.

3.3.2 Interactions opérationnelles

Les Interactions opérationnelles peuvent agir sur la représentation d'un objet, d'un bâtiment ou d'un site pour générer des données d'étude ou de nouvelles représentations dans le cadre d'un processus métier. Ainsi, dans les travaux de Ridel et al. [RRL⁺14], à l'aide d'un système de réalité augmentée projective, les gravures sur pierre sont augmentées d'une représentation numérique afin de mettre en évidence le relief (Fig. 3.13 à gauche). Dans un deuxième exemple présenté dans [GBCG12, CBP⁺17], les gravures d'une pièce du cairn de Barnenez sont mises en évidence dans une reconstruction en réalité virtuelle, basée sur de la photogrammétrie (Fig. 3.13 à droite). Ce exemple résulte d'une collaboration avec l'UMR CReAAH et l'entreprise Virtual-Acheo.

Nous avons proposé des environnements de recherche augmentés et virtuels qui permettent, en amont, de mieux préparer la fouille réelle, en complément, d'accompagner cette fouille, de la documenter, ou *a posteriori*, de revenir sur certains éléments du site de fouille.

Dans la suite, nous présentons des exemples d'interactions opérationnelles mises en œuvre dans le cadre d'études de cas que nous avons réalisées au cours de différents projets avec les métiers du patrimoine culturel. Ces exemples visent à alimenter la réflexion sur leur intérêt dans les chaînes opérationnelles archéologiques.

Les travaux sur les nuages de points présentés dans la Section 3.2.4 comme les outils d'interaction sur le nuage de points provenant d'un scan 3D [GPBG19] et les outils prenant en entrée les données issues de tomodensitométrie, tels que la segmentation, de multi-



FIG. 3.13 – *Interactions opérationnelles avec les gravures en Réalité Augmentée [RRL⁺14] (à gauche) et en Réalité Virtuelle (à droite) [GBCG12, CBP⁺17]*

échelle et multi-sources [DGNG21] sont d'autres exemples d'interactions opérationnelles.

Dans le cas d'une urne de crémation de Guipry (Fig. 3.14, en haut, à gauche), nous avons évalué un système de Réalité Mixte pour préparer au processus archéologique de fouille [GPOG19] (Fig. 3.14, en haut, à droite). En effet, il existe plusieurs stratégies et techniques pour fouiller ce type de matériel archéologique. Le choix de la stratégie se base sur l'expérience et l'appréciation de l'archéologue, sans connaissance du contenu exact. Notre système permet de visualiser l'intérieur du matériel réel, en se basant sur des données issues de scan par tomodensitométrie et guide ainsi la réalisation de la fouille réelle.

Nous avons illustré, dans [LGG⁺18], l'utilisation d'un outil de RV pour la recherche dans le cas d'urnes de crémation. La première implémentation de l'application a été déployée sur un environnement de RV de type *workbench* (Fig. 3.14, en bas) qui était bien adapté à la taille du matériel archéologique étudié et s'insérait de manière naturelle à un environnement de fouille sur pailleasse en laboratoire. Ces travaux sont présentés plus en détail dans la section 3.4.2.

Un dernier exemple de ce type d'interaction est ce que nous avons utilisé pour le site de Beg-Er-Vil. Ce site a fait l'objet de fouilles archéologiques étalées sur plusieurs années. L'application que nous avons conçue permet de traiter, d'interagir avec la masse de données hétérogènes produites tout au long de ces fouilles et propose des outils en RV pour une étude préliminaire de l'interprétation du site [LGG⁺, Léc20] qui sont présentés plus en détail dans la Section 3.4.4.

3.4 Présentation de cas d'études

La méthodologie développée vise à proposer de nouveaux processus et de nouveaux outils pour les experts du patrimoine culturel (par exemple archéologues, historiens, restaurateurs, médiateurs ou conservateurs). Nous nous sommes attachés, tout au long de nos recherches à inclure ces experts dans les différents cas d'utilisation. Nous avons choisi d'appliquer notre approche à plusieurs cas réels afin de valider l'utilité des outils et l'efficacité des processus basés sur les applications de RX. Nous détaillons dans la suite quatre cas d'études qui illustrent des contextes spécifiques avec des objets et des besoins en interaction différents. Il s'agit de la reconstitution d'un navire de la compagnie des Indes du 18ème siècle en Section 3.4.1, l'étude d'une urne de crémation de l'Âge du Fer en



FIG. 3.14 – *Micro-fouille réelle (en haut, à gauche), système de Réalité Mixte pour visualiser l'intérieur de l'urne (en haut, à droite), système de Réalité Virtuelle pour effectuer une fouille virtuelle (en bas)*

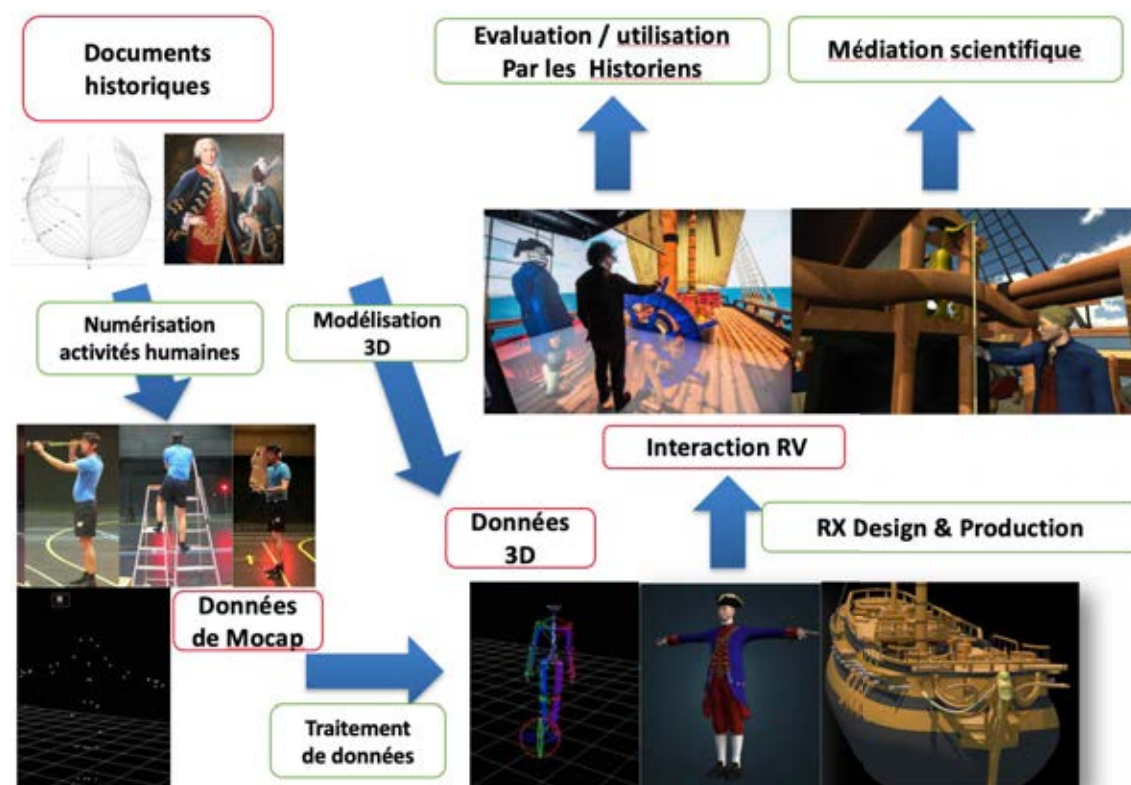
Section 3.4.2, l'étude d'une momie de chat de l'Égypte antique en Section 3.4.3 et enfin la reconstitution du site mésolithique de Beg-er-vil en section 3.4.4.

3.4.1 Reconstitution d'un navire du 18ème siècle

Le Boullongne, navire de la Compagnie des Indes Orientales du XVIII^e siècle, a fait l'objet d'une étude par le département d'histoire maritime de l'Université de Bretagne Sud en raison de la conservation de nombreux documents tels que les journaux de bord et les plans techniques d'architecture navale. Les historiens ne travaillent que sur les documents et non sur les objets contrairement aux archéologues. Cependant, cette spécificité des historiens n'empêche pas ceux-ci de s'appuyer sur une expérience sensorielle à travers la visite de lieux ou la manipulation d'objets pour s'imprégner d'une époque et mieux la comprendre. En suivant cette démarche, nous avons décidé de concevoir une réplique virtuelle de ce navire pour proposer aux historiens une immersion en RV dans l'objet de leur étude et évaluer si cette immersion les conduit à une meilleure compréhension de la vie à bord de l'époque [BNG⁺15] (vidéo²).

Nous avons suivi la méthodologie générale (Fig. 3.15). La modélisation 3D à l'échelle 1:1 a été réalisée par le CNPAO [BGB⁺13] à partir de documents historiques comme des plans architecturaux originaux et d'une maquette du navire. À partir de cette modélisation, nous avons mis ce navire en service par une simulation physique du navire et de son environnement. Le modèle a été intégré dans une simulation maritime, avec plusieurs interactions afin de simuler les fonctions du navire [BNG⁺15] (interactions fonctionnelles présentées en Section 3.3.1).

2. <https://www.youtube.com/watch?v=i6CGVWDjs-At=4s>

FIG. 3.15 – Étude de cas du navire du XVIII^e siècle, le Boullongne

La reconstitution virtuelle permet une nouvelle pratique de validation des sources historiques dans un environnement d'application innovant, impliquant les activités physiques propres aux historiens et leurs perceptions. Être positionnés sur un navire à l'échelle 1 permet aux historiens maritimes d'apprécier les conditions de vie et de travail dans un espace réduit, surpeuplé et en perpétuel mouvement.

La reconstitution historique du Boullongne permet également aux historiens de comprendre l'architecture d'un navire marchand et surtout d'évaluer les dimensions et les volumes des différents espaces, de la cale au pont.

Les historiens tentent de comprendre comment la vie pouvait être organisée sur le navire lors de voyages qui duraient entre cinq et six mois, avec un encombrement important dû à la cargaison et une forte promiscuité, puisque le navire transportait entre 130 et 150 personnes. Par exemple, le passage de l'avant à l'arrière sur le pont supérieur, ou bien la hauteur de l'entrepont où sont placés les canons, semblaient extrêmement étroits aux historiens. Cela soulève la question de l'utilisation réelle des canons, et du déplacement des marins et des passagers sur le pont supérieur. Toutes ces réflexions et discussions entre historiens ont été suscitées à la suite de l'exploration naturelle du navire en RV à l'échelle 1:1. En particulier, la nécessité de marcher en position accroupie sur les ponts intermédiaires a évoqué chez les historiens une étude des journaux de bord des médecins qui a mis en évidence une pathologie particulière des marins : la plupart d'entre eux souffraient de hernies. Le transport et le stockage de marchandises dans des cales exiguës, sans possibilité de se lever, peuvent expliquer en partie cette pathologie.

Afin d'approfondir l'étude des activités humaines à bord du navire, nous avons uti-

lisé la capture de mouvements et la conception graphique de personnages historiquement cohérents pour reconstituer certaines scènes de vie [BGO⁺20]. Les activités réelles ont été conçues et jouées par des historiens eux-mêmes, et nous les avons enregistrés par la capture de mouvement. Les animations ainsi produites ont été appliquées aux personnages virtuels et intégrées dans différentes scènes dans la simulation, enclenchées par la position de l'utilisateur. Ainsi, ce travail, contribue à la préservation du patrimoine immatériel en proposant la numérisation et remise en contexte d'une activité humaine particulière.

Une telle simulation permet aux historiens de naviguer sur un navire disparu et permet de mieux comprendre comment la vie à bord était organisée, en fournissant une expérience personnelle immersive du comportement du navire. Nous avons constaté que cette simulation stimulait la réflexion des historiens et nourrissait des discussions entre historiens. Il est apparu qu'elle provoquait une émotion particulièrement forte chez les historiens peu habitués à ce genre d'expérience. Enfin, elle constitue également un puissant outil pédagogique, donnant vie à un précieux témoignage de notre histoire. La navigation virtuelle de ce navire a été présentée dans le cadre de plusieurs expositions publiques.

3.4.2 Étude d'une urne de crémation

L'urne de crémation de Guipry constitue un sujet d'étude emblématique dans notre démarche de recherche. cette urne de l'Âge du Fer a été découverte à l'occasion de fouilles préventives avec une dizaine d'autres urnes de crémation. Nous avons été associés très tôt à l'étude de ces urnes par les archéologues. L'urne nommée F42A que nous présentons contient des fragments d'os humains et deux objets métalliques, une fibule et une lame de couteau. La Fig. 3.16 synthétise différentes actions de recherche que nous avons menées sur cette urne qui représente un véritable champ d'investigation et d'expérimentation dans notre collaboration avec les archéologues. L'urne a été numérisée en tomodynamométrie. Les données ont été segmentées et les modèles 3D ont été générés pour le contenu interne de l'urne, en particulier les fragments d'os et les pièces métalliques.

Parmi les pièces métalliques, une fibule a été imprimée en 3D et étudiée par les archéologues avant la fouille réelle de l'urne [NGT⁺14]. La numérisation du contenu interne a également été utilisée pour produire une impression 3D à l'échelle 1 transparente complexe de l'ensemble de l'urne et de son contenu [NGT⁺16a] (Fig. 3.17).

Le processus de numérisation basé sur la tomodynamométrie s'est avéré très bien adapté au contexte de ce type de matériel archéologique. Les reconstitutions de volumes à partir de la tomodynamométrie permettent de localiser dans l'espace tous les artefacts et de les identifier. Si la modélisation indique comment les objets ont été organisés dans la sépulture (en particulier l'os incinéré), elle sert surtout à déterminer rapidement si les dépôts contiennent des objets sensibles comme du métal.

Ces informations permettent d'anticiper de manière optimale l'analyse fine des amas et de mettre en place des mesures de protection des artefacts. L'acquisition 3D associée à l'impression 3D d'un élément interne particulier tel que la fibule offre la possibilité de dupliquer un artefact parmi d'autres, conduisant à une identification typologique immédiate de l'artefact, ainsi qu'à des observations morphologiques, typométriques ou technologiques. Enfin, les informations étant connues, il est possible de préparer l'éventuelle fouille réelle ainsi que les opérations de conservation et de restauration souvent requises pour de tels objets.

Ce processus permet de fournir des informations en quelques heures, ce qui n'est pas le cas pour la chaîne opérationnelle communément mise en œuvre qui peut prendre des mois si des mesures de protection sont mises en œuvre, avant l'étude du matériel archéologique.

L'impression 3D complexe fournit une impression du contenant (en transparence) et

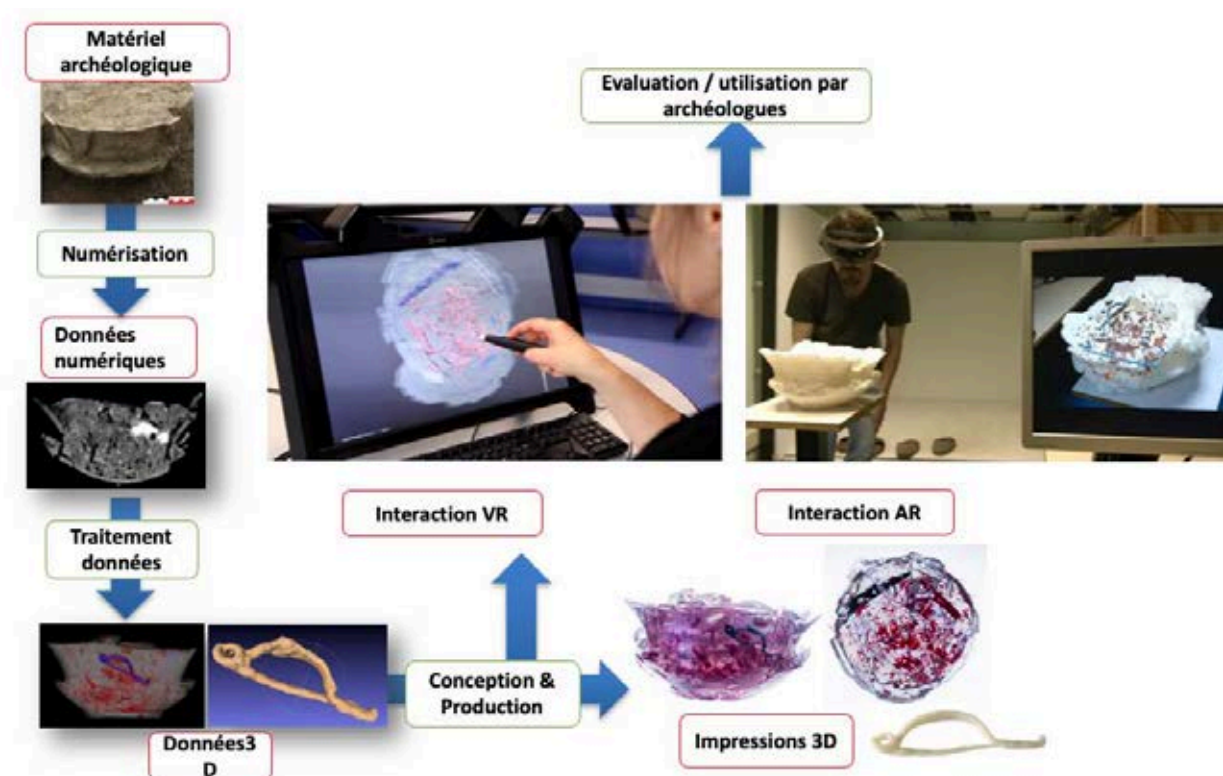


FIG. 3.16 – Étude de cas de l'urne de crémation de Guipry

de son contenu (dépôt funéraire, os et objets en fer brûlés, rivet de couteau et fibule). Sa nature tangible permet un accès direct à l'information et la manipulation physique du dépôt de crémation. Il permet de visualiser et de manipuler le récipient et son contenu dans leur intégralité et avec intégrité. L'impression permet de visualiser les os brûlés qui sont imperceptibles lors de la fouille réelle (trop petits pour être vus, fragiles, ou d'apparence négative), mais aussi certains os bien conservés (un os long) et la détermination des objets en fer (qu'il est possible de libérer virtuellement de leur minéralisation lors des traitements des données). L'impression 3D fournit également des informations pour la reconstruction de l'urne funéraire. Ce support tangible permet une manipulation ou une visualisation simple pour travailler sur l'analyse (comme la répartition des artefacts et les gestes d'inhumation) mais aussi comme support pour la fouille réelle. En effet, l'impression 3D sera le seul support tangible après la fouille réelle de l'incinération.

Nous avons conçu et mis en œuvre deux applications RX (une en réalité mixte et l'autre en réalité virtuelle) afin d'aider les archéologues dans l'étude de ce matériel.

Le système de réalité mixte [GPOG19] associe dans un même espace, le modèle réel (enveloppe de l'urne funéraire) et les modèles 3D virtuels internes obtenus à partir de la reconstruction. Cette possibilité est perçue par l'utilisateur archéologue comme une révolution. Le système a été évalué par des archéologues experts dans l'étude de ce type de matériel. Ils ont confirmé la bonne perception spatiale et ont pu identifier avec précision huit plans de profondeur différents, c'est-à-dire différencier jusqu'à huit éléments les uns derrière les autres, dans l'urne, pour localiser correctement les différents artefacts et évaluer la distance entre eux. Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'[Inrap](#) et le National



FIG. 3.17 – *L'impression 3D transparente de l'urne de Guipry @Irisa*

Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, Japon.

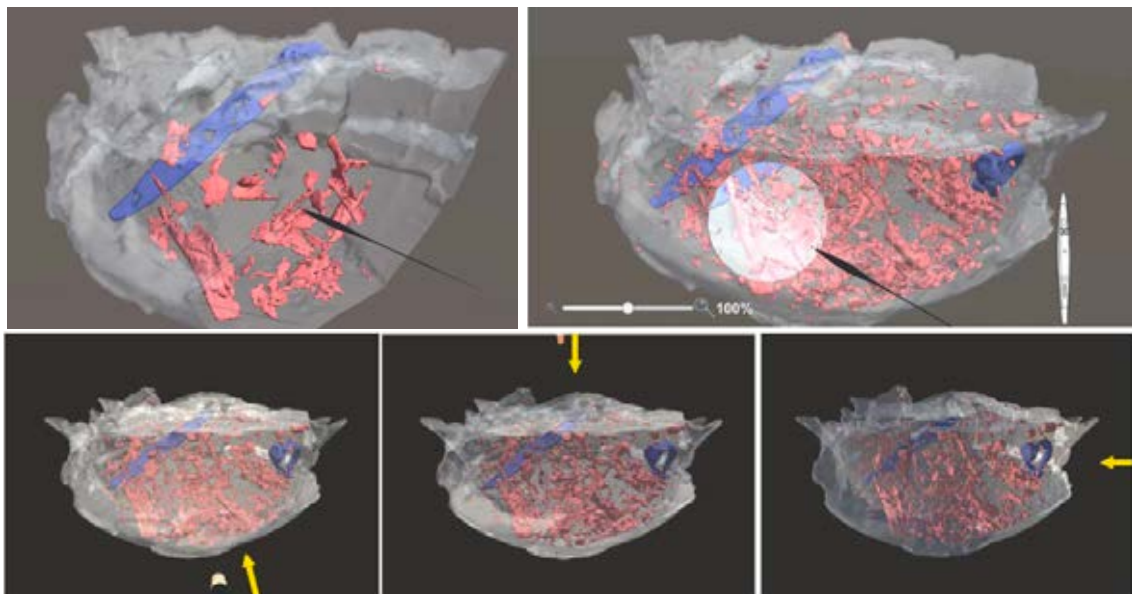
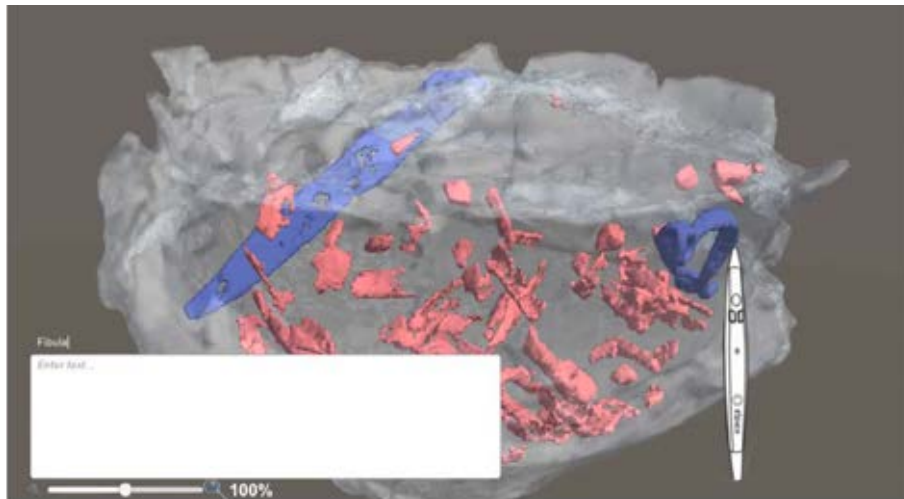


FIG. 3.18 – *Outils : plan de coupe (en haut à gauche), loupe (en haut à droite), lumière directionnelle (avec trois directions différentes, en bas)*

FIG. 3.19 – *Annotation d'un objet*

La seconde application est un système de RV appelé INSIDE [LGG⁺18] est une application interactive d'introspection ou fouille virtuelle (vidéo³). Appliquée à l'urne de Guipry, elle est générique dans sa conception, elle peut utiliser n'importe quel modèle 3D et offre les mêmes caractéristiques et interactions. L'utilisateur peut manipuler, retirer les objets de l'urne, les mesurer. Il peut également manipuler des plans de coupe pour visualiser la structure interne de l'urne et d'autres outils ont été implémentés comme une loupe, une lumière directionnelle (Fig. 3.18). Enfin, la prise de note ainsi qu'un système d'annotation d'objets (Fig. 3.19), de post-it, de création de document et d'exports sont des fonctionnalités importantes et novatrices que nous avons prévues dans l'optique d'une application complète de fouille virtuelle. INSIDE a été évalué par les archéologues afin d'identifier les avantages et les inconvénients de la méthode. Il a été confirmé que cet outil interactif est vraiment utile pour obtenir plus d'informations, car la visualisation à l'intérieur des urnes montre bien les différentes dispositions du contenu, avec des fragments en 3D à l'échelle réelle. L'identification des fragments a été facilitée par la manipulation de chaque fragment seul, pour les isoler du reste. Contrairement à la visualisation directe du scanner à rayon X, qui nécessite une certaine expertise pour obtenir les bons points de vue, la RV offre une interaction 3D naturelle, comme la manipulation d'un plan de coupe. Même si l'information affichée provenant du scan est limitée (densité et forme), elle est suffisamment pertinente pour préparer une fouille réelle, pour concentrer l'effort sur les régions d'intérêt. L'utilisateur peut donc manipuler les objets contenus dans l'urne mais également utiliser des outils à disposition pour les mesurer ou les annoter, ce qui permet de laisser des traces pour d'autres utilisateurs ou lui-même et préparer son rapport de fouille. Cet outil INSIDE est basé sur les propriétés sémantiques des objets et utilise le moteur d'environnement 3D réactif #FIVE. INSIDE a été déposé à l'APP en deux versions : bureau virtuel interactif avec un Zspace et PC.

3.4.3 Étude d'une momie de chat égyptienne

Nous avons travaillé sur une momie de chat particulière, exposée au Musée des Beaux-Arts de Rennes suite aux résultats d'une étude menée par l'Université de Manchester

3. <https://www.youtube.com/watch?v=p0J8iNKo1DQt=49s>



FIG. 3.20 – *Momie de chat et son impression 3D transparente, exposées au Musée des Beaux-Arts de Rennes @MBAR*

[MAWD11] auprès de 800 momies animales qui a montré qu'environ un tiers de ces momies étaient vides. Nous avons utilisé la méthodologie présentée à la Fig. 3.21. Nous avons combiné le scanner à rayon X, l'impression 3D et la RA dans un processus global pour accompagner à la fois une étude scientifique de l'objet et la préparation d'une action de médiation dans un musée destinée à présenter les résultats obtenus [GPN⁺18].

Les résultats de la numérisation par tomographie ont montré que la momie n'était pas vide, ni constituée d'un squelette de chat mais d'un ensemble d'ossements et d'une pelote de ficelle dans la tête. Une achéozoologue a étudié les données numériques obtenues et a pu formuler un certains nombres d'observations et d'hypothèses. Les ossements présents correspondent à des jeunes spécimens dont on ne peut pas déterminer précisément l'espèce car ils n'étaient pas encore matures. Il peut s'agir de petits félins du désert, de chats sauvages ou domestiques. La momie contient des ossements provenant d'au moins trois spécimens différents car trois fémurs gauches sont présents. L'étude de l'Université de Manchester note en particulier que 70% des momies animales sont constituées de plusieurs spécimens. Enfin, les dates du décès sont bien antérieures au moment de la momification.

Nous avons conçu un système de visualisation de l'intérieur de la momie basé sur de la réalité augmentée spatiale (SAR) avec une impression 3D de l'enveloppe de la momie et un pico-projecteur (Fig. 3.21 en bas à droite et image du milieu). La projection s'adapte à la forme de la surface, en prenant en compte le point de vue de l'utilisateur (via un système de *Tracking* avec deux caméras infrarouges et un marqueur positionné sur la tête de l'utilisateur) car le contenu affiché est la structure interne de la momie et pas seulement sa surface externe, comme c'est généralement le cas en RA projective. Un marqueur a également été positionné au dos de la copie de la momie afin de définir la position du modèle 3D de la momie, et un autre sur le pico-projecteur pour la phase de calibration (vidéo⁴).

Le système obtenu étant complexe à mettre en œuvre dans un contexte de musée, nous avons également proposé un système équivalent basé sur une technologie de RA *optical see thought* avec un casque Hololens. Nous avons également fait le portage de ce cas d'usage dans le logiciel de fouille virtuelle INSIDE [LGG⁺18]. Nous avons ajouté dans l'interface un squelette de félin qui permet de faire apparaître la correspondance entre l'os sélectionné et celui du squelette. Ce qui permet de montrer la démarche scientifique de l'archéozoologue par comparaison d'os. Ces deux systèmes ont pu être présentés à plusieurs reprises dans

4. <https://www.youtube.com/watch?v=nUXJ2blcqc>

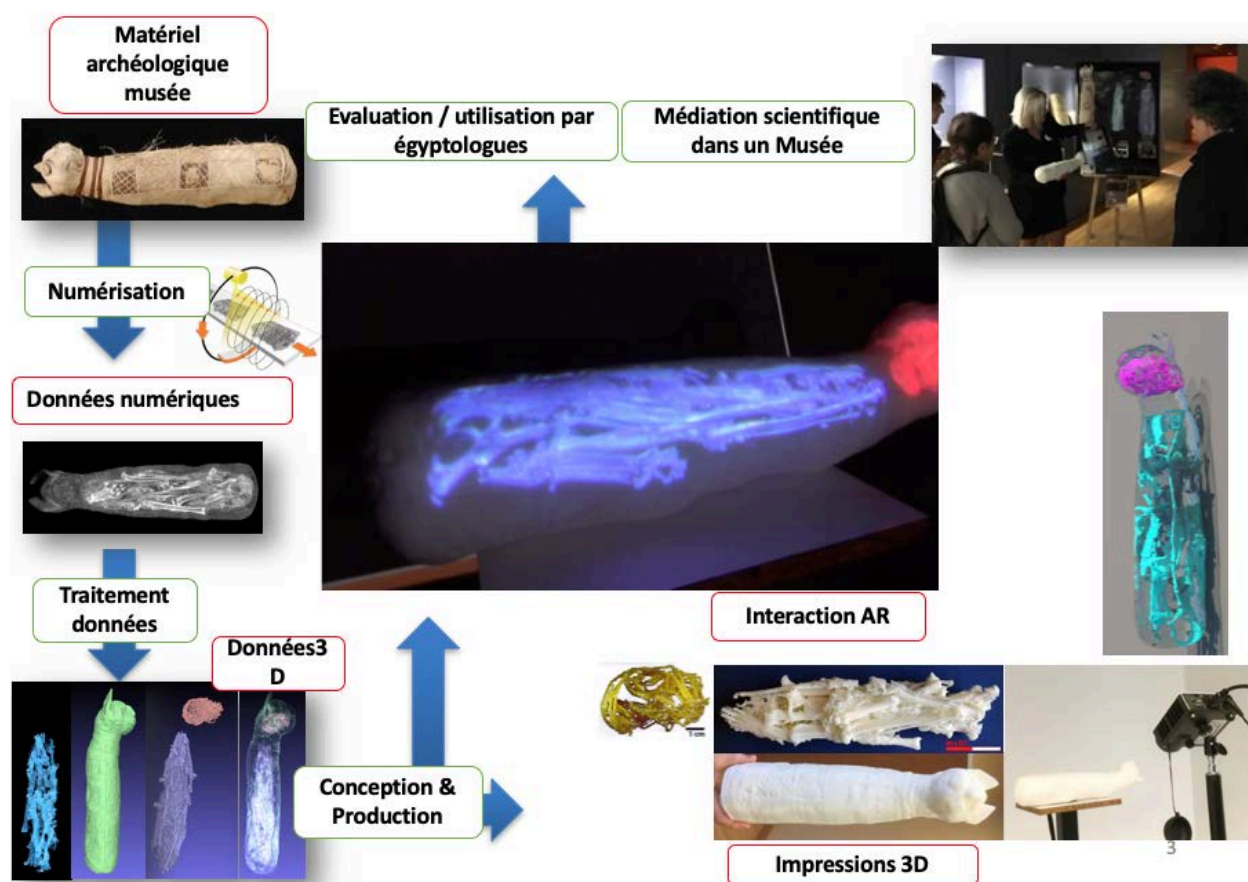


FIG. 3.21 – Étude de cas d'une momie de chat

le musée et lors d'autres actions de médiation.

Enfin, une impression 3D transparente a également été réalisée dans le cadre d'un projet *Chat alors!* financé par Rennes-Métropole A.3. Cette impression est exposée en collection permanente à côté de la momie originale au Musée des Beaux-Arts de Rennes (Fig. 3.20).

Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec l'[Inrap](#), l'[UMR Trajectoires](#), la [Maison de l'Orient et de la Méditerranée](#) (Jean Pouilloux), le [Labex ARCHIMEDE](#) et le [Musée des Beaux-Arts de Rennes](#).

3.4.4 Étude du site de Beg-er-Vil

Le dernier cas d'étude aborde les problématiques liées à l'hétérogénéité des données consécutives à la multiplicité des techniques d'acquisition et de relevés.

De nombreux formats de données sont collectés et il existe peu de compatibilité entre les logiciels. L'accumulation de ces données rend donc complexe l'exploitation de toutes les informations contenues dans ces données.

Nous avons proposé une méthodologie permettant d'agréger les données recueillies sur le site dans un site de fouille virtuel interactif, servant de support pour étudier et commencer l'interprétation du site archéologique à travers les données acquises. La méthodologie proposée comprend trois étapes : l'agrégation, l'interaction et la modélisation immersive



FIG. 3.22 – Le site de Beg-er-Vil pendant la fouille de 2014 (à gauche) et un schéma des différentes campagnes de fouilles (à droite)

[LGG⁺, Léc20] (vidéo⁵).

Notre étude s'est appuyée sur le cas d'un site mésolithique situé en Bretagne, le site de Beg-er-Vil (Morbihan). Les fouilles ont mis en évidence la présence de plusieurs habitations légères centrées sur des foyers et probablement en interaction avec d'autres sites voisins de la même époque. La période de fouille de ce site s'est étalée sur sept ans (Fig. 3.22). L'ensemble des fouilles réalisées sur ce site a produit une quantité extrêmement importante de données de toutes sortes constituées d'objets découverts, de traces d'habitations, de prélèvements d'échantillons analysés en laboratoires.

L'étape d'agrégation vise à intégrer les données obtenues de diverses sources en un seul support d'étude, par exemple le site archéologique reproduit dans son état de fouille. L'étude du site de Beg-er-vil a donné lieu à de nombreuses acquisitions de données.

Plus précisément, l'ensemble des données acquises sur le site de fouille (environ 10 Go) contient : des modèles de photogrammétrie (9 artefacts, 2 modèles pour l'ensemble du site acquis avec un drone après la fouille, et 22 modèles pour des parties du site pendant la fouille), des données sur les objets sous forme de fichier CSV (environ 20000 objets, leurs coordonnées GPS et informations), des données bathymétriques (élévation du fond marin, enrichies avec le niveau de la mer pour trois époques), des prélèvements de pH (échantillonnage sur une grille horizontale de 0,5m par 0,5m sur une partie du site), des cartes 2D générées (distribution des artefacts sur le site, 3 carottes de sondage (coordonnées GPS et composition en fonction de la profondeur et quelques informations supplémentaires (emplacement de deux autres sites de fouille en lien).

Cette étape d'agrégation a été menée en étroite relation avec les archéologues afin de définir des représentations pertinentes pour les différentes données.

L'étape d'interaction fournit des outils interactifs qui permettent à l'archéologue d'obtenir des informations supplémentaires à partir de ce support d'étude. La Figure 3.23 présente les outils de navigation et de visualisation de données PH et l'interface de choix des couches de données. D'autres outils sont disponibles comme un outil de mesure et un outil de photographie virtuelle.

À nouveau, le choix et la conception des interactions a été menée en collaboration étroite avec les archéologues. Il s'agit à ce niveau uniquement d'interactions opérationnelles.

5. <https://www.youtube.com/watch?v=S19W-i8bT1Ut=7s>

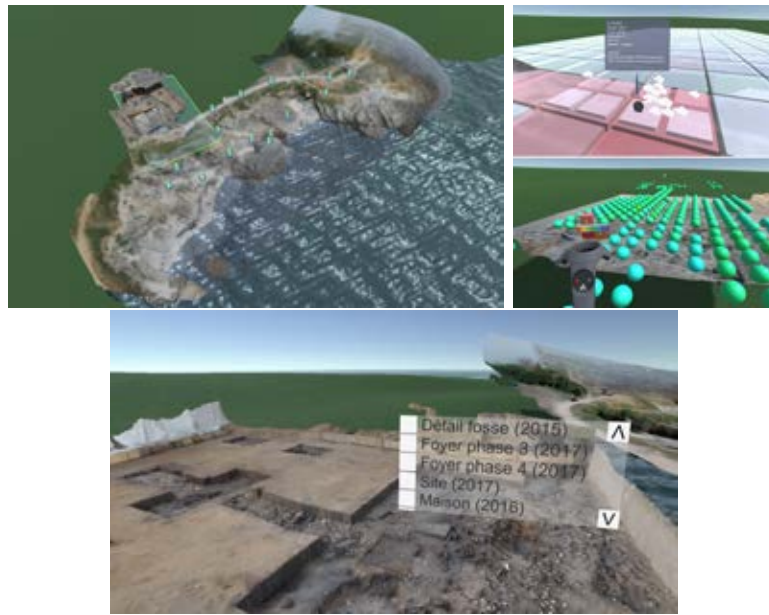


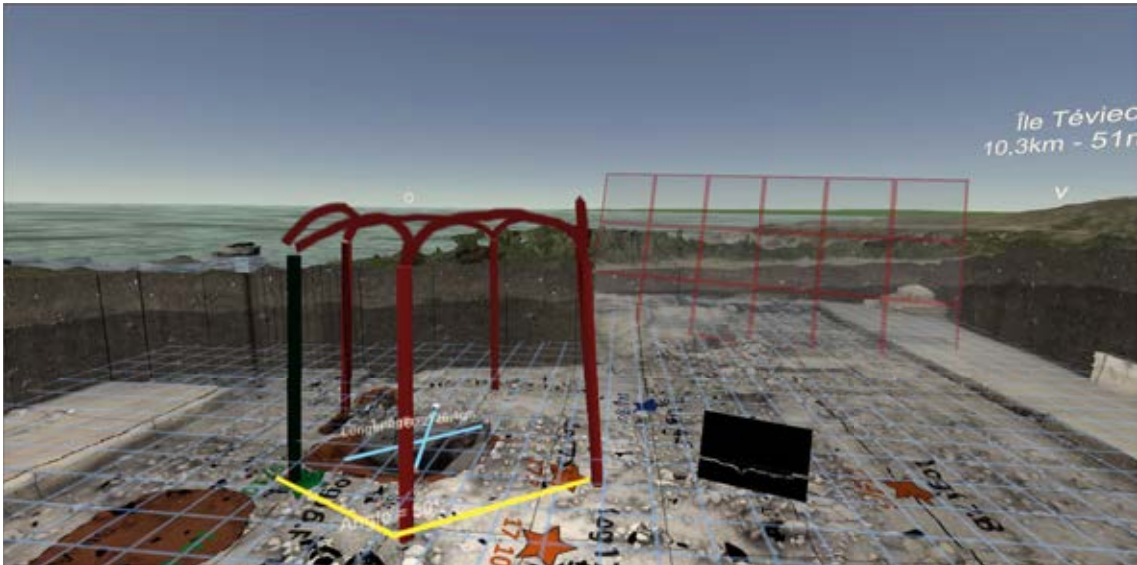
FIG. 3.23 – En haut à gauche, les zones de navigation définies pour le site. A droite, les données CSV avec affichage d'un mètre carré (en haut) et les données de pH (en bas). En bas, l'interface permettant de choisir les couches de données à afficher.

Enfin, l'étape de modélisation immersive (Fig. 3.24) permet à l'archéologue de représenter les hypothèses qui peuvent émerger lors de l'étude du site de fouille virtuel, en ajoutant des objets 3D, des interactions sur des objets existants et des scénarios. Cette étape permet en particulier d'intégrer un certain niveau d'interprétation qui se traduit notamment par la mise en place d'interactions fonctionnelles.

Pour le site archéologique de Beg-er-Vil, certains des artefacts trouvés lors des fouilles ont permis de déterminer un panel d'activités de la vie courante que les archéologues ont souhaité intégrer à la simulation pour reconstituer le fonctionnement du village. Ainsi, nous avons reproduit une cuisson d'un poisson qui associe quatre objets : un poisson, un foyer et deux pierres (une pierre de silex et une pierre de pyrite). Pour ajouter ces interactions très simples, nous avons utilisé le modèle d'environnement 3D réactif #FIVE et nous avons utilisé la solution basée sur la création d'environnement 3D (Section 1.4.2), qui permet l'ajout de comportements sur les objets, et la configuration de fonctionnalités directement dans l'application [LGR⁺19a].

Avec ces quatre objets, un scénario très simple a été défini : allumer le foyer avec les deux pierres, et cuire le poisson avec le feu allumé. Nous avons également conçu un scénario de découverte du site afin de guider l'utilisateur dans la visite du site. Pour créer ces scénarios, nous avons utilisé la méthode du *construire en faisant* (Section 1.5.3) [LGL⁺20], qui consiste à construire le scénario en RV en enregistrant les actions d'un utilisateur.

Bien que proposée dans le contexte de l'étude du site archéologique de Beg-er-Vil, notre méthodologie est conçue pour être utilisable dans tout autre contexte archéologique, et pour être intégrée dans une méthodologie plus large englobant l'ensemble de l'étude d'un site, du début de la fouille à la diffusion des résultats. À l'aide de cette méthodologie, l'archéologue peut extraire un maximum d'informations des données acquises sur un site

FIG. 3.24 – *La fouille virtuelle*

archéologique.

Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec l'UMR CReAAH, l'INRS (Québec), Image ET

3.5 Conclusion de la RX pour le patrimoine culturel

Les méthodes et outils basés sur la RX pour le patrimoine culturel ouvrent de nouvelles perspectives et questions de recherche mais aussi de nouvelles façons de comprendre les métiers du patrimoine culturel. Nous avons proposé une structuration en axe d'étude. Les axes Voir et Révéler se concentrent sur la visualisation avec de la navigation en prenant en compte les spécificités liées au domaine. La plupart des travaux dans l'état de l'art ne dépasse pas ce niveau d'interaction. L'axe Manipuler permet d'atteindre le niveau d'interaction avec les artefacts et leurs contextes. Enfin, l'axe Partager a été défini dans l'optique de fournir aux métiers du patrimoine culturel des outils numériques de travail qui sont complémentaires de leurs outils habituels.

Les visualisations et les interactions avec les objets numériques dans la RX permettent aux experts du patrimoine culturel de travailler de manière non destructive sur du matériel archéologique ou historique qui est généralement extrêmement fragile, souvent difficile d'accès et parfois non visible à l'œil nu.

Nous avons montré que les outils d'interaction en 3D fournissent à l'archéologue un support pour les opérations de fouille ou de restauration. Par exemple, il est possible de préparer une opération en amont, ou de la guider lors de sa réalisation. Dans ce cas, les interactions proposées sont dites opérationnelles. De plus, les données 3D peuvent être intégrées dans un monde virtuel plus riche qui permet de contextualiser l'artefact, qu'il s'agisse d'un contexte de fabrication, d'utilisation ou de découverte. Dans ce cas, il est possible de proposer des interactions avec une simulation de la fonction de l'artefact avec des interactions dites fonctionnelles. Ces outils ont montré qu'ils pouvaient également apporter un soutien aux historiens en leur permettant de s'immerger dans des contextes historiques qui n'existent plus, ce qui n'est pas leur manière habituelle de travailler.

Ces recherches représentent également de nouveaux défis scientifiques dans le domaine des réalités virtuelles, augmentées ou mixtes. La perception des univers 3D à travers la spécificité de l'archéologue en tant qu'utilisateur est un domaine très prometteur. En tant qu'expert professionnel, l'expert en patrimoine culturel ne recherche pas une représentation photoréaliste de son espace d'étude, mais plutôt une représentation qui lui fournisse des informations pertinentes (comme le médecin qui étudie son patient à travers une radiographie ou un scanner).

L'interaction à l'échelle 1:1 avec le déplacement physique est en soi une approche intéressante du monde numérique en 3D en archéologie et plus généralement en patrimoine culturel, car elle combine un mode de perception, la proprioception, et une interaction fondamentale, la navigation naturelle, qui ne sont pas accessibles par un simple écran-clavier-souris.

Les interactions avec des objets multi-échelles, multi-composants ou des données hétérogènes représentent des défis qui restent à relever et qui permettront d'accéder à des données d'une grande richesse. L'interaction avec des objets tangibles dans la réalité mixte ouvre un champ d'investigation important, notamment pour l'interprétation dans des contextes multiples.

Au final, l'expert en patrimoine culturel peut interagir de façon dynamique à plusieurs niveaux : il recherche les liens entre les éléments d'un site, ses propres interactions avec ces éléments mais aussi les interactions que pourraient avoir eues les humains à l'époque avec ce site. Il est donc également important de proposer des représentations et des simulations de l'activité humaine dans des environnements contextualisés.

Enfin, nous avons pu montrer, à travers certains cas d'usage, l'intérêt des abstractions et outils que nous avons proposés dans les chapitres 1 et 2 qui permettent à l'expert métier de créer lui-même l'environnement 3D réactif et ses scénarios en interagissant dans l'application immersive.

Chapitre 4

Conclusion

L'objectif de nos travaux a été de concevoir une méthodologie pour construire des applications collaboratives de RX qui ne soit pas dédiée à un domaine applicatif particulier, tout en exploitant leurs spécificités, et qui d'autre part soit destinée aux experts métier donc à destination de non-informaticiens. La méthodologie sera particulièrement performante dans le cas de familles d'applications pour lesquelles il existe de la variabilité et un cycle de production qui peut être itératif. Cette méthodologie a induit des contributions avec des propositions de modèles, de langages et d'outils logiciels. Pour valider l'approche, nous avons étudié des domaines applicatifs variés comme la santé, le bâtiment, les arts numériques et le patrimoine culturel. Pour chacun d'entre eux, nous nous sommes rapprochés d'experts métier et nous avons proposé non seulement des contributions de RX mais également des applications de RX validées par ces derniers.

Nous concluons sur nos contributions concernant les modèles et outils de RX dans la Section 4.1. Ces abstractions nous ont permis de proposer des applications de RX dans des domaines applicatifs variés que nous résumons dans la Section 4.2

4.1 Conception des applications de RX

Nous avons tout d'abord proposé des modèles pour la performance des applications de RV, d'une part pour les applications couplées à des grappes de PC et d'autre part pour le pipeline et les algorithmes de la détection de collision sur machines multicœurs ou multi-GPU.

Nous avons ensuite défini des modèles pour collaboration distante en RX. Nous avons étudié la cohérence, l'espace d'interaction des utilisateurs et l'*awareness* (conscience de soi et des autres) pour la collaboration asymétrique. Nous avons également évalué l'influence sur un utilisateur en RV d'un public distant ou co-localisé.

En ce qui concerne le collaborateur, nous avons proposé un modèle unifié d'interaction collaborative ainsi qu'un modèle unifié pour les humains virtuels et réels. Ces modèles nous ont permis de permettre un échange entre un utilisateur et un humain virtuel, ce qui est très utile dans le cadre de la formation virtuelle collaborative. Nous avons également évalué différentes métaphores d'échange d'avatars et proposé des recommandations quant à leur conception. Nous avons validé ces différents concepts dans un environnement virtuel collaboratif.

En nous basant sur ces modèles, nous avons étudié la manière de représenter et d'abstraire l'environnement 3D pour que les objets ne soient pas juste pourvus d'informations géométriques. Nous avons proposé un modèle objet-relation pour enrichir l'environnement 3D d'informations sémantiques dans le cadre de la RV et de la RA. Ces informations

spécifient les propriétés et capacités des objets ainsi que les relations entre ces objets. Nous avons montré que cet environnement 3D réactif peut être construit par un utilisateur non informaticien directement dans l'application ou bien être alimenté semi-automatiquement par des données structurées de haut niveau comme des ontologies métier ou le BIM. Les informations sémantiques ainsi intégrées dans l'environnement permettent d'une part à l'utilisateur d'interagir avec tous les objets qui sont complètement spécifiés et d'autre part au développeur de créer des requêtes sur cet environnement par exemple pour savoir ce que l'utilisateur peut faire avec un objet avec lequel il souhaite interagir.

Les actions de l'utilisateur sont dans la plupart des cas développées par un langage généraliste. Nous avons proposé que les activités d'un utilisateur soient représentées par un langage dédié et nous avons conçu un modèle de scénario, basé séquençement d'actions, qui repose sur un modèle de réseaux de Petri que nous avons enrichi pour répondre aux contraintes d'un environnement de RX. Ce scénario peut être construit par un utilisateur non informaticien via un éditeur graphique, ou bien directement dans l'application de RV si l'environnement 3D réactif est défini. Nous avons étendu notre modèle de production pour créer un scénario semi-automatiquement à partir de données structurées de haut niveau comme les ontologies métier ou le BIM. Enfin, avec différentes instances d'un scénario, nous avons montré qu'il était possible de le généraliser par synthèse en créant des nouvelles branches. Ces différentes méthodes de création de scénario permettent une grande variabilité de définition de scénario pour un environnement 3D réactif donné.

Nous nous sommes attachés à proposer des modèles et outils non dédiés à un domaine applicatif particulier. Pour autant nos modèles sont d'autant plus performants dans le cas de réutilisation, par exemple, quand le même environnement est utilisé par plusieurs scénarios ou bien si un même sous-scénario est défini dans plusieurs scénarios ou différents environnements.

Pour concevoir les nombreuses applications mentionnées dans ce document, nous avons utilisé des outils de développements basés sur nos modèles et munis d'interfaces graphiques d'édition, comme l'environnement 3D réactif de type objet-relation avec #FIVE, et le modèle de séquençement d'actions avec #SEVEN, ainsi que d'autres outils pour augmenter la productivité de création des applications de RX comme le suivi de l'exécution du scénario, la mise en évidence d'actions ou d'objets ou la pose de main. Certains outils ont fait l'objet de développements logiciels maturés et de dépôts APP et sont utilisés par des entreprises partenaires.

4.2 Domaines applicatifs

En nous entourant systématiquement d'expert métier, nous avons appliqué notre démarche à différents domaines. Nous avons tout d'abord contribué dans le domaine de la santé, que ce soit en chirurgie ou en rééducation. Nous avons conçu des simulateurs pour des compétences techniques et non techniques pour le personnel soignant. Nous nous sommes également intéressés à l'apport de nos modèles pour des patients en situation de handicap. Nous avons défini une application de RV couplée à une plate-forme mécanique simulant un fauteuil roulant électrique avec assistance à la navigation. L'intérêt de ce simulateur est double. Il permet d'une part de tester les algorithmes d'assistance et d'autre part de former les utilisateurs qui n'ont pas encore le droit de conduire de fauteuil afin de les rendre plus autonomes dans leur mobilité. Nous avons effectué des expérimentations cliniques avec des personnes en situation de handicap dont certaines ne peuvent bénéficier d'un fauteuil roulant électrique classique car leur conduite est dangereuse. Nous avons par

exemple comparé des versions réelles et virtuelles de tâches de navigation, et nous avons démontré que notre simulateur avait un réel intérêt pour ces personnes.

Dans un tout autre domaine, celui du bâtiment, nous avons conçu une méthodologie de co-conception et une méthode de création d'applications de formation en RV à la sécurité sur un chantier (correspondant à celui de l'apprenant et qui est dans son état actuel).

Dans un contexte complètement différent, mais en poursuivant notre démarche de modèles de production d'application de RV, nous avons étudié des environnements virtuels qui s'adressent aux émotions des utilisateurs avec les arts et le domaine de la créativité artistique. Nous avons collaboré avec des artistes pour proposer à la fois des environnements pour la production d'œuvres, pour leur exposition au public, et pour la réalisation de performances artistiques. Ainsi dans le domaine de la réalisation cinématographique, nous avons montré que les acteurs de films avec VFX préfèrent s'entraîner en RV plutôt que sur un fond vert. Nous avons conçu, proposé et exposé des œuvres numériques comme par exemple une visite en RV de l'histoire de la musique qui immerge l'utilisateur dans chaque époque avec un environnement sonore et virtuel associés. Enfin, nous avons conçu des environnements virtuels d'arts numériques pour des performances artistiques comme par exemple une application en RV collaborative distante de co-conception d'un univers partagé entre un danseur, un musicien, des utilisateurs et des spectateurs pour les emmener dans un état de lâcher-prise.

Un dernier domaine applicatif que nous avons particulièrement approfondi est celui du patrimoine culturel et nous nous sommes également entourés d'expert de ce domaine pour valider nos contributions. Ce domaine a montré que la RX était une réponse à deux problématiques spécifiques que nous avons identifiées pour celui-ci. La première est liée à la fragilité des artefacts et de leur environnement qui peuvent être détruits ou dégradés lors d'opérations de fouilles archéologiques ou de restauration entraînant la perte d'informations potentiellement précieuses. La seconde problématique est liée à la difficulté voire l'impossibilité de mise en contexte des artefacts lors de leur analyse, étude, conservation ou valorisation, que ce soit pour une mise en fonction ou un placement dans un environnement plus large, ce qui peut entraîner également une perte d'information ou une mauvaise interprétation.

Nous avons proposé des contributions méthodologiques avec une structuration en axes d'études (voir, révéler, manipuler et partager) ou selon les types d'interactions possibles (fonctionnelles ou opérationnelles).

Nous avons défini une méthode de travail que nous avons instanciée sur chaque cas d'usage. Elle est initié par des informations matérielles ou immatérielles du patrimoine culturel et se conclut par des applications de RX mettant en contexte l'artefact ou le site étudié et permettant ainsi aux experts d'enrichir leur pratique métier avec cette approche numérique qui n'est pas destructrice.

Notre méthodologie de fouille virtuelle est aussi utile pour l'apprentissage et représente une étape de pré-étude qui est complémentaire à la fouille réelle, les deux types de fouilles virtuelles et réelles s'alimentant mutuellement tout au long du processus de l'expert métier.

Dans nos applications de RX, nous avons utilisé des techniques innovantes comme par exemple des scans à rayon X pour révéler la structure interne des objets, l'impression 3D comme objet tangible pour interagir ou encore l'impression 3D transparente comme outil d'étude et de médiation.

Nous avons démontré notre propos avec plusieurs cas d'usage de grande ampleur comme par exemple un navire de la compagnie des Indes Orientales, que nous avons mis en contexte pour l'étude de la vie à bord, une urne de crémation, qui nous a permis de

concevoir une application de fouille virtuelle basée scanner à rayon X, une momie de chat qui a fait l'objet d'une médiation importante et un site mésolithique fouillé sur plusieurs années qui nous a permis de montrer qu'il était possible de gérer une masse de données hétérogènes pour concevoir une fouille virtuelle.

Chapitre 5

Perspectives

Les perspectives générales de nos recherches à long terme sont de proposer à un utilisateur non informaticien, un expert métier par exemple, de concevoir lui-même une application de RX collaborative sans qu'il doive écrire de code informatique. Même si nos contributions vont dans ce sens, nous devons encore améliorer les méthodologies afin d'augmenter la productivité dans la création des applications en insérant une forme d'automatisation aux modèles proposés comme l'environnement 3D réactif et la scénarisation (Section 5.1). De plus, pour des domaines applicatifs que nous étudions activement comme par exemple le patrimoine culturel ou la santé, nous nous attachons à spécifier nos méthodes pour les rendre encore plus efficaces et dédiées au domaine d'étude (Section 5.2). À long terme, nous estimons que la productivité des applications de RX repose d'une part, sur l'intégration de principes hauts niveaux du génie logiciel et d'autre part, dans le cadre des applications de formation, sur des approches de développement centrées sur la pédagogie (Section 5.3).

5.1 Conception des applications de RX

Performance

La performance des applications de RX est critique pour que l'utilisateur reste présent et immergé dans l'environnement. À moyen terme, nous envisageons également de nous appuyer sur des modèles de prédiction, soit hors ligne, soit dynamiques. Cette prédiction peut être utilisée dans des applications où la latence pose problème comme par exemple pour des environnements collaboratifs distants. Si nous devons utiliser la puissance de l'intelligence artificielle de type *deep learning*, qui n'est pas utilisable en temps interactif, nous devons proposer, à terme, des méthodes de prédiction hors ligne qui pourraient s'adapter aux événements dynamiques issus de l'environnement ou de l'utilisateur.

Collaboration

Même si nos modèles sont prévus pour cette dimension collaborative, les extensions qui en sont faites doivent toujours supporter cette fonctionnalité qui doit être prise en compte dès le début de la conception. En effet, rajouter la dimension collaborative après coup nécessite souvent beaucoup de modifications profondes.

De plus, si l'expert métier doit concevoir ce type d'application, il faudra lui fournir des outils simples d'utilisation pour cette dimension collaborative qui n'est souvent pas évidente selon le niveau de collaboration souhaitée (qui peut aller jusqu'à la co-manipulation).

Modèles

Notre démarche de conception d'application collaborative de RX repose particulièrement sur deux modèles, le modèle d'environnement 3D réactif et le modèle de scénarisation. Nous avons pu explorer le cas du BIM pour alimenter nos modèles mais il reste encore de l'automatisation à prévoir car le modèle BIM ne contient pas toutes les informations nécessaires dans le cadre d'application de RX, notamment celles qui concernent la définition de l'interaction. Il faut donc au préalable une étape manuelle d'ajout d'information. En revanche, le BIM, par sa richesse d'information, comme par exemple la durée de vie d'un bâtiment, de la construction à son démantèlement, avec les différents corps de métiers, ouvre de nombreuses perspectives de conception d'applications de RX avec une automatisation. Nous avons proposé une méthodologie pour la chasse aux risques en ajoutant des informations générales de listes d'erreurs non spécifiques à un chantier. À moyen terme, nous pouvons concevoir d'autres applications, par exemple, pour une étape de construction ou encore un corps de métier en particulier. Ces applications pourraient servir de formation, d'entraînement avant le travail sur chantier réel, ou encore de pré-étude pour améliorer les processus de conception du bâtiment.

Une attention particulière sera faite autour des ontologies, à moyen terme, il faudra étendre notre méthodologie pour intégrer une étape supplémentaire qui permette d'inférer les informations déduites des ontologies et les insérer dans nos modèles d'environnement 3D réactif et de scénarisation. Ces perspectives sont à développer en collaboration avec les collègues spécialistes des ontologies.

Nos modèles sont définis pour des actions discrètes, donc non continues. Il n'est donc pas toujours adapté aux gestes précis, par exemple avec de l'haptique. Si nous souhaitons aller dans ce sens, à long terme, il faudra sans doute revoir les socles sur lesquels nous nous sommes appuyés pour définir d'une part, le modèle d'environnement 3D réactif et d'autre part, le modèle de scénarisation afin de proposer d'autres formalismes.

La méthode de synthèse de scénarios sera à étendre afin d'une part de valider plus aisément par l'utilisateur les branches non correctes qui ont été ajoutées et d'autre part, déterminer plus finement quelles parties du scénario seraient à généraliser. Il se peut que la méthode de synthèse actuelle soit à enrichir. Ces perspectives de méthodes de synthèse de scénarios nécessitent de continuer nos collaborations avec des équipes d'informatique formelle.

Notre modèle de scénario par séquençement d'actions est par essence procédural, à moyen terme, il serait intéressant de l'étendre à des actions orientées buts (on ne décrit pas les actions à faire mais le but à atteindre). Nous avons choisi la philosophie des actions liées aux procédures car nous voulions le contrôle de l'application et nous souhaitions que l'expert métier fasse lui même les actions souhaitées. Cependant, il serait intéressant d'ajouter ces actions orientées buts pour des sous actions tout en gardant le contrôle. Nous avons d'ores et déjà conçu quelques exemples de ce type sans modifier le modèle actuel. À moyen terme, une étude plus poussée montrera peut être qu'il faudra une hybridation du modèle avec un peu de planification ou modification du modèle, tout en gardant le contrôle de l'application et la spécificité de notre approche basée sur l'implication de l'expert métier dans la conception.

5.2 Domaines applicatifs

Santé

Comme indiqué précédemment, la santé est un domaine applicatif que nous étudions en collaboration avec les experts métiers du domaine, que ce soit en chirurgie ou en rééducation.

Nous pouvons élargir le domaine de la chirurgie pour aller jusqu'aux soins médicaux et para-médicaux, ce qui nous permettrait de passer à l'échelle pour le nombre d'utilisateurs visés. Nous pourrions montrer que pour de la formation, notre méthodologie est à la fois applicable et motivante pour les jeunes générations afin de les former efficacement.

Le domaine de la rééducation nous a permis d'étudier plusieurs axes. Un des axes est l'utilisation de nos modèles pour la simulation de fauteuil roulants électriques avec assistance à la navigation. Une perspective, à moyen terme, serait d'étendre à une simulation de navigation inclusive avec un environnement peuplé. Nous pourrions cibler comme premier exemple un musée. En effet, peu de personnes en situation de handicap avec un fauteuil roulant électrique ne s'y rend, sans doute par crainte de la proximité des œuvres qui ne sont pas toujours placées en adéquation avec ce genre de public. Nous pourrions simuler d'une part la prise en compte de cet environnement écologique pour une simulation crédible et d'autre part proposer si nécessaire des ajustements d'organisation au sein des musées.

Le deuxième axe que nous abordons est dédié à la rééducation clinique de patients pour une réinsertion professionnelle suite à des traitements dûs à un cancer qui ont des plaintes cognitives. Nous chercherons à étendre notre modèle de scénarisation pour qu'il puisse s'adapter au niveau cognitif et à la charge mentale de l'utilisateur afin qu'il reste engagé dans la tâche en se rééduquant ou en apprenant à contourner une déficience.

Patrimoine culturel

Dans ce domaine, un des défis majeurs est que le passage au numérique n'est pas encore effectif à ce jour. La perception des univers 3D à travers la spécificité d'un expert du patrimoine culturel en tant qu'utilisateur est un domaine qui reste à l'heure actuelle très ouvert. Il faut donc concevoir des représentations adaptées à l'expert métier comme par exemple des représentations d'hypothèses indiquant leur niveau de fiabilité. Les interactions avec des objets multi-échelles, multi-composants, représentent des défis qui restent à relever, à moyen terme, et qui permettront d'accéder à des données d'une grande richesse. L'interaction avec des objets tangibles dans la réalité mixte ouvre un champ d'investigation important, notamment pour l'interprétation dans des contextes multiples.

Enfin, les applications liées au patrimoine culturel sont particulièrement appréciées du grand public. Nous souhaitons nous appuyer sur cette dynamique pour mettre en avant les modèles informatiques afin de promouvoir notre discipline auprès des jeunes et particulièrement des collégiennes et lycéennes.

5.3 Vers la productivité des applications de RX

À long terme, les perspectives s'articulent autour de deux axes. Le premier axe concerne l'intégration dans nos travaux des principes de développement du génie logiciel. Le second axe correspond à des approches de développements d'application de RX centrées sur la pédagogie.

La production de logiciels est une étape importante de nos travaux. Il existe une branche du génie logiciel dont l'un des objectifs est de résoudre les problèmes d'abstraction et de réutilisation, l'Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM). L'IDM est une méthodologie de production de logiciels reposant sur la définition de modèles, qui sont une représentation abstraite d'un domaine. L'IDM a notamment pour but de travailler sur certaines parties d'un logiciel à un meilleur niveau d'abstraction que le code. En particulier, la variabilité logicielle et les lignes de produits permettent de considérer le développement logiciel au niveau d'une famille d'applications. Adaptées à la RX, ces approches permettraient de réduire de manière significative les développements et fournissent des moyens efficaces de tests logiciels.

Les travaux existants, cependant, n'ont pas traité ces problèmes majeurs de variabilité logicielle et de lignes de produits dans les applications de RX ni du test de ces applications, ce qui reste un frein à la conception de ce type d'applications. L'objectif serait d'améliorer la production d'applications de RX sujettes à un important facteur de variabilité. Pour cela, des techniques de l'IDM (gestion de la variabilité, ligne de produit dynamique, langage dédié de type DSL, Domain Specific Language) pourront être étudiées lors de la phase de conception. L'objectif sera de produire les composants logiciels génériques et communs à une famille d'applications de RX. Les bénéfices attendus sont une factorisation et une semi-automatisation de cette production. Ces perspectives sont à réaliser en collaboration avec des équipes d'IDM.

À titre d'illustration, nous pouvons citer les expérimentations utilisateurs. Le développement d'expérimentation est une tâche à la fois fastidieuse et chronophage. Lorsque les termes de l'expérimentation sont définis, nous pourrions approfondir notre approche utilisant l'IDM pour la concevoir de manière plus générique et automatique. L'objectif serait de permettre aux concepteurs d'expérimentations de se concentrer sur leurs tâches principales : la conception, la réalisation et l'analyse. Ces tâches sont en effet globalement les mêmes quelle que soit l'expérimentation envisagée et ne sont pourtant pas ré-utilisées ni définies de manière générique.

Le second axe concerne les approches de développement d'applications de RX centrées sur la pédagogie. Nos modèles sont d'ores et déjà adaptés à la prise en compte d'informations de nature pédagogique. Cependant, il est possible d'aller plus loin dans une intégration plus fine de la pédagogie au sein des applications de RX.

Tout d'abord, différents modèles pédagogiques d'apprentissage existent et devront être intégrés dans notre démarche de production d'applications de RX. Ces modèles seront à disposition de l'expert métier en pédagogie pour la production avec un processus automatique de ses scénarios selon le modèle pédagogique souhaité.

Ensuite, sans préjuger du domaine de formation, l'élaboration des nouveaux langages dédiés de type DSL (Domain Specific Language), sera envisagée pour ajouter de nouvelles fonctionnalités dans l'environnement 3D réactif ou dans le modèle de scénarisation, comme par exemple des nouvelles primitives ou des interactions directes en RX effectuées par le pédagogue.

Enfin, des schémas classiques d'apprentissage et de pédagogie devront être mis en place pour de la ré-utilisation, par exemple sous la forme de *templates* spécifiques, pour démontrer la pertinence et le passage à l'échelle de la démarche.

Bibliographie

- [AA05] N Applbaum and YH Applbaum. 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, 2005.
- [ABB⁺01] Ronald T. Azuma, Yohan Baillot, Reinhold Behringer, Steven Feiner, Simon Julier, and Blair MacIntyre. Recent advances in augmented reality. *IEEE computer graphics and applications*, 21(6):34–47, 2001.
- [ABCN01] P. Hartling K. Meinert A. Baker A. Bierbaum, C. Just and C. Cruz-Neira. VR Juggler: a virtual platform for virtual reality application development. In *Virtual Reality*, pages 89–96. IEEE, March 2001.
- [ACC⁺18] Bruno Arnaldi, Stéphane Cotin, Nadine Couture, Jean-Louis Dautin, Valérie Gouranton, Francois Gruson, and Domitile Lourdeaux. New applications. In *Virtual Reality and Augmented Reality - Myths and Realities*, volume chapter 1, pages 1–71. March 2018.
- [ACC⁺22] Andreas Aristidou, Alan Chalmers, Yiorgos Chrysanthou, Céline Loscos, Franck Multon, Bhuvaneswari Sarupuri, and Efsthathios Stavarakis. Safeguarding our dance cultural heritage. In *EUROGRAPHICS*, 2022.
- [AGA10] Quentin Avril, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. Synchronization-Free Parallel Collision Detection Pipeline. In *(20th International Conference on Artificial Reality and Telexistence)*, pages 1–7, Adelaide, Australia, December 2010.
- [AGA11] Quentin Avril, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. Dynamic Adaptation of Broad Phase Collision Detection Algorithms. In *ISVRI, Conjunction with IEEE Virtual Reality (VR)*, page 7p, Singapore, March 2011.
- [AGA12] Quentin Avril, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. Fast Collision Culling in Large-Scale Environments Using GPU Mapping Function. In *ACM Eurographics Parallel Graphics and Visualization*, pages 71–80, Cagliari, Italy, May 2012.
- [AGA14] Quentin Avril, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. Collision Detection: Broad Phase Adaptation from Multi-Core to Multi-GPU Architecture. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 6(11):1–13, July 2014.
- [AGL⁺02] Jérémie Allard, Valérie Gouranton, Loick Lecointre, Emmanuel Melin, and Bruno Raffin. NetJuggler, Running VrJuggler with Multiple Displays on a Commodity Component Cluster. pages 1–8. IEEE, March 2002.
- [AGL⁺03] Jérémie Allard, Valérie Gouranton, Guy Lamarque, Emmanuel Melin, and Bruno Raffin. Softgenlock: active stereo and genlock for pc cluster. pages 255–260. Eurographics, 2003.
- [AGL⁺04] Jérémie Allard, Valérie Gouranton, Loïc Lecointre, Sébastien Limet, Emmanuel Melin, Bruno Raffin, and Sophie Robert. Flowvr: a middleware

- for large scale virtual reality applications. In *EUROPAR*, Lecture Notes in Computer Science 3149, pages 497–505. Springer, 2004.
- [AK18] Stephan Beck Carl-Feofan Matthes Andre Schollmeyer Adrian Kreskowski Bernd Fröhlich Sue Cobb Mirabelle D’Cruz Alexander Kulik, André Kunert. Virtual valcamonica: Collaborative exploration of prehistoric petroglyphs and their surrounding environment in multi-user virtual reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 26 (3):297–321, 2018.
- [Avr11] Quentin Avril. *Détection de Collision pour environnements large échelle : modèle unifié et adaptatif sur architectures multi-coeur et multi-GPU*. PhD thesis, INSA Rennes, 2011. Thèse de doctorat dirigée par Bruno Arnaldi, encadrée par Valérie Gouranton.
- [Bar17] Jean-Baptiste Barreau. *Techniques de production, d’exploration et d’analyse d’environnements archéologiques virtuels*. Theses, INSA de Rennes, July 2017. Thèse de doctorat dirigée par Bruno Arnaldi, encadrée par Valérie Gouranton.
- [BBLN⁺14] Rozenn Bouville Berthelot, Thomas Lopez, Florian Nouviale, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. An interaction abstraction model for seamless avatar exchange in CVET. In *2014 International Workshop on Collaborative Virtual Environments (3DCVE)*, Minneapolis, United States, March 2014. IEEE VR.
- [BBP⁺14] Jean-Baptiste Barreau, Yann Bernard, Quentin Petit, Laurent Beuchet, Emilien Petit, Volker Platen, Ronan Gaugne, Julien Le Rumeur, and Valérie Gouranton. 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, November 2014.
- [BEL02] Norman I. Badler, Charles A. Erignac, and Ying Liu. Virtual humans for validating maintenance procedures. *Commun. ACM*, 45(7):56–63, July 2002.
- [BGA16] Rozenn Bouville, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. Virtual Reality Rehearsals for Acting with Visual Effects. In *International Conference on Computer Graphics & Interactive Techniques*, GI, pages 1–8, Victoria-BC, Canada, 2016.
- [BGB⁺13] Jean-Baptiste Barreau, Ronan Gaugne, Yann Bernard, Gaétan Le Cloirec, and Valérie Gouranton. The West Digital Conservatory of Archaeological Heritage Project. In *DH*, pages 1–8, France, 2013.
- [BGB⁺15] Rozenn Bouville, Valérie Gouranton, Thomas Boggini, Florian Nouviale, and Bruno Arnaldi. #FIVE: High-Level Components for Developing Collaborative and Interactive Virtual Environments. In *Proceedings of Eighth Workshop on Software Engineering and Architectures for Realtime Interactive Systems (SEARIS 2015), conjunction with IEEE Virtual Reality (VR)*, Arles, France, March 2015.
- [BGG⁺17a] Jean-Baptiste Barreau, Adeline Gagnier, Ronan Gaugne, Grégor Marchand, Jorge Calvo Gómez, Rozenn Colleter, and Valérie Gouranton. A multi-modal digital analysis of a mesolithic clavicle: preserving and studying the oldest human bone in Brittany. In *2017 - 3D Imaging in Cultural Heritage Conference*, London, United Kingdom, November 2017.
- [BGG17b] Jean-Baptiste Barreau, Ronan Gaugne, and Valerie Gouranton. Immersive point cloud manipulation for cultural heritage documentation. *ERCIM news*, pages 33–34, 2017.

- [BGG⁺22] Jean-Baptiste Barreau, Adeline Gagnier, Ronan Gaugne, Grégor Marchand, Jorge Calvo Gómez, Valérie Gouranton, and Rozenn Colleter. Use of different digitization methods for the analysis of cut marks on the oldest bone found in brittany (france). *Applied Sciences*, 12(3), 2022.
- [BGL⁺20a] Guillaume Bataille, Valérie Gouranton, Jérémy Lacoche, Danielle Pelé, and Bruno Arnaldi. A Unified Design & Development Framework for Mixed Interactive Systems. In *VISIGRAPP, GRAPP, the 15th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*, Valletta, Malta, 2020.
- [BGL⁺20b] Guillaume Bataille, Valérie Gouranton, Jérémy Lacoche, Danielle Pelé, and Bruno Arnaldi. Unified model and framework for interactive mixed entity systems. In Kadi Bouatouch, A. Augusto de Sousa, Manuela Chessa, Alexis Paljic, Andreas Kerren, Christophe Hurter, Giovanni Maria Farinella, Petia Radeva, and José Braz, editors, *Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications - 15th International Joint Conference, VISIGRAPP 2020 Valletta, Malta, February 27-29, 2020, Revised Selected Papers*, volume 1474 of *Communications in Computer and Information Science*, pages 3–25. Springer, 2020.
- [BGLA21] Guillaume Bataille, Valérie Gouranton, Jérémy Lacoche, and Bruno Arnaldi. Managing mutual occlusions between real and virtual entities in virtual reality. In A. Augusto de Sousa, Vlastimil Havran, José Braz, and Kadi Bouatouch, editors, *Proceedings of the 16th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications, VISIGRAPP 2021, Volume 1: GRAPP, Online Streaming, February 8-10, 2021*, pages 37–44. SCITEPRESS, 2021.
- [BGN⁺19] Nicolas Bazoge, Ronan Gaugne, Florian Nouviale, Valérie Gouranton, and Bruno Bossis. Expressive potentials of motion capture in the Vis Insita musical performance. In *NIME 2019 - The International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, pages 1–5, Porto Alegre, Brazil, June 2019.
- [BGO⁺20] Jean-Baptiste Barreau, Ronan Gaugne, Anne-Hélène Olivier, Sylviane Llinares, and Valérie Gouranton. Reconstitution de la vie à bord d’un navire de la Compagnie des Indes orientales au XVIIIe siècle. In *Situ : Revue des patrimoines*, 42(42):1–17, 2020.
- [BJH99] Doug A. Bowman, Donald B. Johnson, and Larry F. Hodges. Testbed evaluation of virtual environment interaction techniques. In *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST ’99*, pages 26–33, New York, NY, USA, 1999. ACM.
- [BKH97] Doug A. Bowman, David Koller, and Larry F Hodges. Travel in immersive virtual environments: an evaluation of viewpoint motion control techniques. In *Proceedings of IEEE 1997 Annual International Symposium on Virtual Reality*, pages 45–52, 215, Mar 1997.
- [BKY⁺17] Johanna Barbier, Patricia Kenny, Jordan Young, Jean-Marie Normand, Mark T. Keane, Muiris O’Sullivan, and Anthony Ventresque. MAAp annotate: When archaeology meets augmented reality for annotation of megalithic art. In *23rd International Conference on Virtual System & Multimedia, VSMM 2017*, pages 1–8, 2017.
- [BLDM⁺19] Marie-Stéphanie Bracq, Marie Le Duff, Estelle Michinov, Bruno Arnaldi, Valérie Gouranton, Jeanne Descamps, and Pierre Jannin. Training situa-

- tion awareness through error recognition in an immersive virtual operating room. In Frontiers, editor, *International conference for multi-area simulation ICMA Sim 2019*, International conference for multi-area simulation ICMA Sim 2019, pages 208–216, Angers, France, October 2019.
- [BMA⁺19] Marie-Stéphanie Bracq, Estelle Michinov, Bruno Arnaldi, Benoît Caillaud, Bernard Gibaud, Valérie Gouranton, and Pierre Jannin. Learning procedural skills with a virtual reality simulator: An acceptability study. *Nurse Education Today*, 79:153 – 160, 2019.
- [BMD⁺21] Marie-Stéphanie Bracq, Estelle Michinov, Marie Le Duff, Bruno Arnaldi, Valérie Gouranton, and Pierre Jannin. “Doctor, please”: Educating nurses to speak up with interactive digital simulation tablets. *Clinical Simulation in Nursing*, 54:97–104, May 2021.
- [BMLD⁺21] Marie-Stéphanie Bracq, Estelle Michinov, Marie Le Duff, Bruno Arnaldi, Valérie Gouranton, and Pierre Jannin. Training situational awareness for scrub nurses: Error recognition in a virtual operating room. *Nurse Education in Practice*, 53:1–10, May 2021.
- [BNB⁺14a] Jean-Baptiste Barreau, Théophane Nicolas, Guillaume Bruniaux, Emilien Petit, Quentin Petit, Yann Bernard, Ronan Gaugne, and Valérie Gouranton. Ceramics Fragments Digitization by Photogrammetry, Reconstructions and Applications. In *International Conference on Culturage Heritage, EuroMed, 2014*, Lemessos, Cyprus, November 2014.
- [BNB⁺14b] Jean-Baptiste Barreau, Théophane Nicolas, Guillaume Bruniaux, Emilien Petit, Quentin Petit, Yann Bernard, Ronan Gaugne, and Valérie Gouranton. Photogrammetry Based Study of Ceramics Fragments. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 3:643 – 656, 2014.
- [BNG⁺15] Jean-Baptiste Barreau, Florian Nouviale, Ronan Gaugne, Yann Bernard, Sylviane Llinares, and Valérie Gouranton. An Immersive Virtual Sailing on the 18 th -Century Ship Le Boullongne. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 24(3), 2015.
- [BPB⁺15] Jean-Baptiste Barreau, Quentin Petit, Yann Bernard, Reginald Auger, Yannick Le Roux, Ronan Gaugne, and Valérie Gouranton. 3D reconstitution of the loyola sugar plantation and virtual reality applications. In *Proceedings of Computer Applications & Quantitative Methods in Archaeology, CAA* , Sienna, Italy, 2015.
- [BPF⁺15] M. Babel, F. Pasteau, B. Fraudet, S. Achille, A. Colin, B. Nicolas, A. Duruffe, L. Le Pape, and P. Gallien. Assessment of a navigation assistance system for power wheelchair. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 58:e99, 2015. 30th Annual Congress of the French Society of Physical and Rehabilitation Medicine.
- [BR05] Oliver Bimber and Ramesh Raskar. *Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds*. A K Peters/CRC Press, July 2005.
- [Cai13] Benoît Caillaud. Surgical Process Mining with Test and Flip Net Synthesis. In Robin Bergentum and Josep Carmona, editors, *Application of Region Theory (ART)*, pages 43–54, Barcelona, Spain, July 2013.
- [CAL⁺06] Chris Christou, Cameron Angus, Celine Loscos, Andrea Dettori, and Maria Roussou. 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, 2006. ACM.

- [CBK17] J. Casarin, D. Bechmann, and M. Keller. A unified model for interaction in 3d environment. In *ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST)*, page 7 pages. ACM, Nov 2017.
- [CBP⁺17] Florian Cousseau, Yann Bernard, Quentin Petit, Jean-Baptiste Barreau, Ronan Gaugne, and Laurent Quesnel. Relever les élévations d’une architecture mégalithique : développements méthodologiques. In *GMPCA 2017 - XXIème Colloque international du Groupe des Méthodes Pluridisciplinaires Contribuant à l’Archéologie*, Rennes, France, April 2017. CNRS UMR6566 CReAAH.
- [CGA15a] Guillaume Claude, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. Roles in Collaborative Virtual Environments for Training. In M. Imura, P. Figueroa, and B. Mohler, editors, *Proceedings of International Conference on Artificial Reality and Telexistence Eurographics Symposium on Virtual Environments, ICAT-EGVE*, pages 1–8, Kyoto, Japan, 2015.
- [CGA15b] Guillaume Claude, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. Versatile Scenario Guidance for Collaborative Virtual Environments. In *Proceedings of 10th International Conference on Computer Graphics Theory and Applications (GRAPP’15)*, berlin, Germany, March 2015.
- [CGBBA14] Guillaume Claude, Valérie Gouranton, Rozenn Bouville Berthelot, and Bruno Arnaldi. Short Paper: #SEVEN, a Sensor Effector Based Scenarios Model for Driving Collaborative Virtual Environment. In T. Nojima, D. Reiners, and O. Staadt, editors, *ICAT-EGVE, International Conference on Artificial Reality and Telexistence, Eurographics Symposium on Virtual Environments*, pages 1–4, Bremen, Germany, December 2014.
- [CGC⁺16a] Guillaume Claude, Valérie Gouranton, Benoît Caillaud, Bernard Gibaud, Bruno Arnaldi, and Pierre Jannin. Synthesis and Simulation of Surgical Process Models. *Studies in Health Technology and Informatics*, 220:63–70, 2016.
- [CGC⁺16b] Guillaume Claude, Valérie Gouranton, Benoît Caillaud, Bernard Gibaud, Pierre Jannin, and Bruno Arnaldi. From Observations to Collaborative Simulation: Application to Surgical Training. In *ICAT-EGVE 2016 - International Conference on Artificial Reality and Telexistence, Eurographics Symposium on Virtual Environments*, Little Rock, Arkansas, United States, December 2016.
- [CGS21] Pierre-Antoine Cinquin, Pascal Guitton, and Hélène Sauzéon. Towards Truly Accessible MOOCs for Persons with Cognitive Impairments: a Field Study. *Human-Computer Interaction*, 2021.
- [CKP95] James Cremer, Joseph Kearney, and Yiannis Papelis. HCSM: a framework for behavior and scenario control in virtual environments. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)*, 5(3):242–267, 1995.
- [Cla16] Guillaume Claude. *Séquencement d’actions en environnement virtuel collaboratif*. Theses, INSA Rennes, July 2016. Thèse de doctorat dirigée par Bruno Arnaldi, encadrée par Valérie Gouranton.
- [CMH⁺19] Andrea Cheville, Sarah McLaughlin, Tufia Haddad, Kathleen Lyons, Robin Newman, and Kathryn Ruddy. Integrated rehabilitation for breast cancer survivors. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation, MPH*, 98:154–164, 2019.

-
- [CNSD⁺92] Carolina Cruz-Neira, Daniel J. Sandin, Thomas A. DeFanti, Robert V. Kenyon, and John C. Hart. The cave: Audio visual experience automatic virtual environment. *Commun. ACM*, 35(6):64–72, June 1992.
 - [CTB⁺12] Pierre Chevaillier, Thanh-Hai Trinh, Mukesh Barange, Pierre De Loor, Frédéric Devillers, Julien Soler, and Ronan Querrec. Semantic modeling of Virtual Environments using MASCARET. In *2012 5th Workshop on Software Engineering and Architectures for Realtime Interactive Systems (SEARIS)*, pages 1–8, 3 2012.
 - [DDF⁺10] Florent Dupont, Thierry Duval, Cédric Fleury, Julien Forest, Valérie Gouranton, Pierre Lando, Thibaut Laurent, Guillaume Lavoué, and Alban Schmutz. Collaborative Scientific Visualization: The COLLAIVIZ Framework. In *JVRC 2010 (2010 Joint Virtual Reality Conference of EuroVR - EGVE - VEC)*, Fellbach, Germany, October 2010.
 - [DGA16] Anne-Solène Dris, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. Integration concept and model of Industry Foundation Classes (IFC) for interactive virtual environments. In *33rd CIB W78 Conference*, Brisbane, Australia, 2016.
 - [DGNG21] Rafik Drissi, Ronan Gaugne, Théophane Nicolas, and Valérie Gouranton. Immersive Volumetric Point Cloud Manipulation for Cultural Heritage. In *ICAT-EGVE 2021 - 31th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT 2021) and the 26th Eurographics Symposium on Virtual Environments (EGVE 2021)*, International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments, pages 1–5, Sankt Augustin, Germany, September 2021.
 - [DLAG13] Steve Dodier-Lazaro, Quentin Avril, and Valérie Gouranton. SODA: A Scalability-Oriented Distributed & Anticipative Model for Collision Detection in Physically-based Simulations. In *GRAPP, International Conference on Computer Graphics Theory and Applications*, pages 1–10, Barcelone, Spain, February 2013.
 - [DLGA18a] Anne-Solène Dris, François Lehericey, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. Risk-Hunting Training in Interactive Virtual Environments. In *24th CIB W99 Conference*, pages pp 1–8, Salvador, Brazil, 2018.
 - [DLGA18b] Anne-Solène Dris, François Lehericey, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. OpenBIM Based IVE Ontology: an ontological approach to improve interoperability for Virtual Reality Applications. In *35th CIB W78 Conference*, pages 1–10, Chicago, United States, 2018.
 - [DNF⁺12] Thierry Duval, Thi Thuong Huyen Nguyen, Cédric Fleury, Alain Chauffaut, Georges Dumont, and Valérie Gouranton. Embedding the Features of the Users’ Physical Environments to Improve the Feeling of Presence in Collaborative Virtual Environments. In *CogInfoCom 2012 (3rd IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications)*, Kosice, Slovakia, December 2012.
 - [DNF⁺14] Thierry Duval, Thi Thuong Huyen Nguyen, Cédric Fleury, Alain Chauffaut, Georges Dumont, and Valérie Gouranton. Improving Awareness for 3D Virtual Collaboration by Embedding the Features of Users’ Physical Environments and by Augmenting Interaction Tools with Cognitive Feedback Cues. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 8(2):187–197, June 2014.

- [Don04] Stéphane Donikian. *Modélisation, contrôle et animation d'agents virtuels autonomes évoluant dans des environnements informés et structurés*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Rennes 1, 8 2004.
- [FCD⁺10] Cédric Fleury, Alain Chauffaut, Thierry Duval, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. A Generic Model for Embedding Users' Physical Workspaces into Multi-Scale Collaborative Virtual Environments. In *ICAT 2010 (20th International Conference on Artificial Reality and Telexistence)*, Adelaide, Australia, December 2010.
- [FDGA10a] Cédric Fleury, Thierry Duval, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. A New Adaptive Data Distribution Model for Consistency Maintenance in Collaborative Virtual Environments. In *JVRC 2010 (2010 Joint Virtual Reality Conference of EuroVR - EGVE - VEC)*, Fellbach, Germany, September 2010.
- [FDGA10b] Cédric Fleury, Thierry Duval, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. Architectures and Mechanisms to Maintain efficiently Consistency in Collaborative Virtual Environments. In *SEARIS 2010 (IEEE VR 2010 Workshop on Software Engineering and Architectures for Realtime Interactive Systems)*, Waltham, United States, March 2010.
- [FDGS12] Cédric Fleury, Thierry Duval, Valérie Gouranton, and Anthony Steed. Evaluation of Remote Collaborative Manipulation for Scientific Data Analysis. In *VRST 2012 - 18th Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pages 129–136, Toronto, Canada, December 2012. ACM.
- [FK10] Maurizio Forte and Gregorij Kurillo. Cyberarchaeology: Experimenting with teleimmersive archaeology. In *2010 16th International Conference on Virtual Systems and Multimedia*, pages 155–162, Oct 2010.
- [Fle12] Cédric Fleury. *Modèles de conception pour la collaboration distante en environnements virtuels distribués : de l'architecture aux métaphores*. PhD thesis, INSA Rennes, 2012. Thèse de doctorat dirigée par Bruno Arnaldi, encadrée par Thierry Duval et Valérie Gouranton.
- [FMA06] Philippe Fuchs, Guillaume Moreau, and Bruno Arnaldi. *Le traité de la réalité virtuelle Volume 4 - Les applications de la réalité virtuelle*. Mathématique et informatique. Presse des Mines, 3 2006.
- [For11] Maurizio Forte. Cyber-archaeology: Notes on the simulation of the past. *Virtual Archaeology Review*, 2(4):7–18, 5 2011.
- [GASG⁺14] Francesco Grani, Ferran Argelaguet Sanz, Valérie Gouranton, Marwan Badawi, Ronan Gagne, Stefania Serafin, and Anatole Lécuyer. Audio-Visual Attractors for Capturing Attention to the Screens When Walking in CAVE Systems. In *Sonic interaction with a virtual orchestra of factory machinery*, pages 1–4, Minneapolis, United States, March 2014. IEEE VR.
- [GBCG12] Ronan Gagne, Jean-Baptiste Barreau, Florian Cousseau, and Valérie Gouranton. Large-scale immersive reconstitution of a Neolithic corbel dome. In *International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, pages pp 1–8, Brighton, United Kingdom, November 2012.
- [GBL⁺22] Ronan Gagne, Jean-Baptiste Barreau, Flavien Lécuyer, Théophane Nicolas, Jean-Marie Normand, and Valérie Gouranton. eXtended Reality for Cultural Heritage. In *Handbook of Cultural Heritage Analysis*, pages 1405 – 1437. 2022.

- [GG20] Ronan Gaugne and Valérie Gouranton. De la tomographie à l'interaction 3D en eXtended Reality. *Les Nouvelles de l'archéologie*, (159):79–84, 2020.
- [GGA09] Stéphanie Gerbaud, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. Adaptability properties of a Collaborative Virtual Environment for Training. In Springer Berlin / Heidelberg, editor, *Edutainment*, volume 5670 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages pp 316–327, Banff, Canada, 2009.
- [GGD⁺14] Ronan Gaugne, Valérie Gouranton, Georges Dumont, Alain Chauffaut, and Bruno Arnaldi. Immersia, an open immersive infrastructure: doing archaeology in virtual reality. *Archeologia e Calcolatori, supplemento 5*, pages 1–10, 2014.
- [GLCBG13] Ronan Gaugne, Gaétan Le Cloirec, Jean-Baptiste Barreau, and Valérie Gouranton. 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, 2013.
- [GLF⁺21] Lysa Gramoli, Jérémy Lacoche, Anthony Foulonneau, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. Needs Model for an Autonomous Agent during Long-term Simulations. In *4th IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality, AIVR - workshop MARCH*, pages 1–5, Taichung, Taiwan, November 2021. IEEE.
- [GLJF⁺20] Ronan Gaugne, Françoise Labaune-Jean, Dominique Fontaine, Gaétan Le Cloirec, and Valérie Gouranton. From the engraved tablet to the digital tablet, history of a fifteenth century music score. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 13(3):1–18, 2020.
- [GLMM04] Valérie Gouranton, Sébastien Limet, Souley Madougou, and Emmanuel Melin. A scalable cluster-based parallel simplification framework for height fields. In Bruno Raffin, Dirk Bartz, and Han-Wei Shen, editors, *5th Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Parallel Graphics and Visualization (EGPGV 2004), 10-11 June 2004, Grenoble, France*, pages 59–65, 2004.
- [GM12] J.-C. Granry and M. C. Moll. Rapport de mission. État de l'art (national et international) en matière de pratiques de simulation dans le domaine de la santé. dans le cadre du développement professionnel continu (dpc) et de la prévention des risques associés aux soins., 2012.
- [GMG⁺08] Stéphanie Gerbaud, Nicolas Mollet, Franck Ganier, Bruno Arnaldi, and Jacques Tisseau. GVT: a platform to create virtual environments for procedural training. In *Virtual Reality Conference, 2008. VR'08. IEEE*, pages 225–232. IEEE, 2008.
- [GMMN05] V. Gouranton, Souley Madougou, Emmanuel Melin, and Cyril Nortet. Interactive rendering of massive terrains on PC clusters. In Ken Brodlie, David Duke, and Ken Joy, editors, *EUROVIS 2005: Eurographics / IEEE VGTC Symposium on Visualization*. The Eurographics Association, 2005.
- [GNB⁺17] Ronan Gaugne, Théophane Nicolas, Jean-Baptiste Barreau, Grégor Marchand, Reginald Auger, Pierre Francus, and Valérie Gouranton. Méthodes d'introspection numérique pour les objets archéologiques. In *GMPCA 2017 - XXIème colloque international du Groupe des Méthodes Pluridisciplinaires Contribuant à l'Archéologie*, rennes, France, April 2017.
- [GNP⁺21] Ronan Gaugne, Théophane Nicolas, julie Priser, Marion Lemaire, Dominique bernard, meven leblanc, Jim Pavan, Tom roy, Raphael Dupont,

- julie ayoubi, Marie-Marie Le Cornec, and Valérie Gouranton. Interaction avec la sirène de Cagniard-Latour en réalité virtuelle. In *Humanistica 2021 - Colloque de l'Association francophone des humanités numériques*, pages 1–4, Rennes, France, May 2021.
- [GNR⁺18] Ronan Gaugne, Florian Nouviale, Octavia Rioual, Arnaud Chirat, Kevin Gohon, Vincent Goupil, Martin Toutirais, Bruno Bossis, and Valérie Gouranton. EvoluSon: Walking through an Interactive History of Music. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 26(3):281–296, 2018.
- [Gos14] Louis Pierre Gosselin. 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. Masters' Thesis, Université de Sherbrooke, 2014.
- [GPBG19] Ronan Gaugne, Quentin Petit, Jean-Baptiste Barreau, and Valérie Gouranton. Interactive and Immersive Tools for Point Clouds in Archaeology. In *International Conference on Artificial Reality and Telexistence - Eurographics Symposium on Virtual Environments*, Tokyo, Japan, 2019.
- [GPJ14] B. Gibaud, C. Penet, and P. Jannin. Ontospm : a core ontology of surgical procedure models. *SURGETICA*, 2014.
- [GPN⁺18] Ronan Gaugne, Stéphanie Porcier, Théophane Nicolas, François Coulon, Odile Hays, and Valérie Gouranton. A digital introspection of a mummy cat. In *Digital Heritage, 3rd International Congress & Expo, New Realities: Authenticity & Automation in the Digital Age, IEEE*, pages 1–8, San francisco, United States, 2018.
- [GPOG19] Ronan Gaugne, Quentin Petit, Mai Otsuki, and Valérie Gouranton. Evaluation of a Mixed Reality based Method for Archaeological Excavation Support. In *International Conference on Artificial Reality and TelexistenceEurographics Symposium on Virtual Environments*, Tokyo, Japan, 2019.
- [GSN⁺18] Ronan Gaugne, Myrsini Samaroudi, Théophane Nicolas, Jean-Baptiste Barreau, Laurent Garnier, Karina Rodriguez Echavarria, and Valérie Gouranton. Virtual Reality (VR) interactions with multiple interpretations of archaeological artefacts. In *EG GCH 2018 - 16th EUROGRAPHICS Workshop on Graphics and Cultural Heritage*, pages 1–9, Vienna, Austria, November 2018.
- [HCK⁺01] Roger Hubbard, Jonathan Cook, Martin Keates, Simon Gibson, Toby Howard, Alan Murta, Adrian West, and Steve Pettifer. Gnu/maverik: A microkernel for large-scale virtual environments. *Presence*, 10:22–34, 02 2001.
- [HJB⁺15] Olivia Hulot, Marine Jaouen, Jean-Baptiste Barreau, Yann Bernard, Quentin Petit, Ronan Gaugne, and Valérie Gouranton. Study of a wreck in Foreshore Context. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pages 131–138, April 2015.
- [HN07] Sorin Hermon and Joanna Nikodem. 3D Modelling as a Scientific Research Tool in Archaeology. In K. Lambers Posluschny, A. and I. Herzog, editors, *Proceedings of the 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, pages 140–145 + CD-ROM, 4 2007.

-
- [Hou73] Godfrey N Hounsfield. Computerized transverse axial scanning (tomography): Part 1. Description of system. *The British Journal of Radiology*, 46(552):1016–1022, 1973. PMID: 4757352.
 - [Hug15] Jeremy Huggett. A manifesto for an introspective digital archaeology. *Open Archaeology*, 1(1):86–95, 2015.
 - [JR97] W. Lewis Johnson and Jeff Rickel. Steve: An animated pedagogical agent for procedural training in virtual environments. *SIGART Bull.*, 8(1-4):16–21, December 1997.
 - [KLS⁺18] Philipp Kurth, Vanessa Lange, Christian Siegl, Marc Stamminger, and Frank Bauer. Auto-calibration for dynamic multi-projection mapping on arbitrary surfaces. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, PP:1–1, 09 2018.
 - [Kra00] Louise Krasniewicz. Immersive imaging technologies for archaeological research. *CAA: The 28th Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, 843:163–169, 2000.
 - [LBBLE⁺14] Thomas Lopez, Rozenn Bouville Berthelot, Emilie Loup-Escande, Florian Nouviale, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. Exchange of avatars: Toward a better perception and understanding. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, pages 1–10, March 2014.
 - [LC09] Gaëtan Le Cloirec. Les atouts de l’imagerie 3d pour l’archéologie de terrain (réflexions à partir d’exemples fouillés récemment en bretagne). *Actes du colloque Virtual Retrospect*, 4:107–113, 2009.
 - [LC10] Jean-Luc Lugin and Marc Cavazza. Towards AR game engines. In Marc Erich Latoschik, Dirk Reiners, Roland Blach, Pablo Figueroa, and Raimund Dachsel, editors, *3rd workshop on software engineering and architecture of realtime interactive systems SEARIS*. Shaker Verlag, 2010.
 - [LC16] Morgan Le Chénéchal. *Awareness Model for Asymmetric Remote Collaboration in Mixed Reality*. PhD thesis, INSA Rennes, 2016. Thèse de doctorat dirigée par Bruno Arnaldi, Thierry Duval et Jérôme Royan, encadrée par Valérie Gouranton.
 - [LCAD⁺14] Morgan Le Chénéchal, Bruno Arnaldi, Thierry Duval, Valérie Gouranton, and Jérôme Royan. From 3D Bimanual Toward Distant Collaborative Interaction Techniques: An Awareness Issue. In *2014 International Workshop on Collaborative Virtual Environments (3DCVE)*, Minneapolis, United States, March 2014. IEEE VR.
 - [LCCD⁺15] Morgan Le Chénéchal, Sébastien Chalmé, Thierry Duval, Jérôme Royan, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. Toward an Enhanced Mutual Awareness in Asymmetric CVE. In *Proceedings of International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS 2015)*, Atlanta, United States, 2015.
 - [LCDG⁺15] Morgan Le Chénéchal, Thierry Duval, Valérie Gouranton, Jérôme Royan, and Bruno Arnaldi. The Stretchable Arms for Collaborative Remote Guiding. In *Proceedings of International Conference on Artificial Reality and Telexistence Eurographics Symposium on Virtual Environments, ICAT-EGVE*, Kyoto, Japan, 2015.
 - [LCDG⁺16] Morgan Le Chénéchal, Thierry Duval, Valérie Gouranton, Jérôme Royan, and Bruno Arnaldi. Vishnu: Virtual Immersive Support for HelpiNg Users - An Interaction Paradigm for Collaborative Remote Guiding in Mixed

- Reality. In *3DCVE 2016: International Workshop on Collaborative Virtual Environments*, pages 1 – 5, Greenville, United States, March 2016. IEEE.
- [LCDG⁺19] Morgan Le Chénéchal, Thierry Duval, Valérie Gouranton, Jérôme Royan, and Bruno Arnaldi. Help! I Need a Remote Guide in my Mixed Reality Collaborative Environment. *Frontiers in Robotics and AI*, 2019.
- [LCG⁺13] Chen-Kim. Lim, Marie-Paule Cani, Quentin Galvane, Julien Pettré, and Talib Abdullah Zawawi. Simulation of past life: Controlling agent behaviors from the interactions between ethnic groups. In *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, volume 1, pages 589–596, Oct 2013.
- [LCG⁺14] Thomas Lopez, Pierre Chevaillier, Valérie Gouranton, Paul Evrard, Florian Nouviale, Mukesh Barange, Rozenn Bouville Berthelot, and Bruno Arnaldi. Collaborative Virtual Training with Physical and Communicative Autonomous Agents. *Computer Animation and Virtual Worlds*, pages 1–9, May 2014.
- [LCL⁺13] Vincent Lanquepin, Kevin Carpentier, Domitile Lourdeaux, Margaux Lhommet, Camille Barot, and Kahina Amokrane. HUMANS: a HUMAN Models based Artificial eNvironments software platform. In *VRIC’13*, pages 59–68, Laval, France, 3 2013.
- [LCLR⁺16] Morgan Le Chénéchal, Jérémy Lacoche, Jérôme Royan, Thierry Duval, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. When the Giant meets the Ant An Asymmetric Approach for Collaborative and Concurrent Object Manipulation in a Multi-Scale Environment. In *3DCVE 2016: International Workshop on Collaborative Virtual Environments*, pages 1 – 4, Greenville, United States, March 2016. IEEE.
- [Léc20] Flavien Lécuyer. *Méthodes de production d’applications de XR interactives, application à l’archéologie*. Theses, INSA de Rennes, September 2020. Thèse de doctorat dirigée par Bruno Arnaldi et Grégor Marchand, encadrée par Valérie Gouranton.
- [Leh16] François Lehericey. *Détection de collision par lancer de rayon: La quête de la performance*. Theses, INSA Rennes, September 2016. Thèse de doctorat dirigée par Bruno Arnaldi, encadrée par Valérie Gouranton.
- [LGA13a] François Lehericey, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. New Iterative Ray-Traced Collision Detection Algorithm for GPU Architectures. In *VRST*, pages 215–218, Singapore, 2013.
- [LGA13b] François Lehericey, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. Ray-Traced Collision Detection: Interpenetration Control and Multi-GPU Performance. In *5th Joint Virtual Reality Conference of EuroVR - EGVE*, pages 1–8, Paris, France, 2013.
- [LGA15a] François Lehericey, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. GPU Ray-Traced Collision Detection: Fine Pipeline Reorganization. In *Proceedings of 10th International Conference on Computer Graphics Theory and Applications (GRAPP’15)*, Berlin, Germany, March 2015.
- [LGA15b] François Lehericey, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. GPU Ray-Traced Collision Detection for Cloth Simulation. In *Proceedings of ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, Pékin, China, 2015.
- [LGG⁺] Flavien Lécuyer, Valérie Gouranton, Ronan Gaugne, Adrien Reuzeau,

- Grégor Marchand, and Bruno Arnaldi. Virtual excavation, a new way of practicing archaeology. *soumission*.
- [LGG⁺18] Flavien Lécuyer, Valérie Gouranton, Ronan Gaugne, Théophane Nicolas, Grégor Marchand, and Bruno Arnaldi. INSIDE Interactive and Non-destructive Solution for Introspection in Digital Environments. In *Digital Heritage 2018 - 3rd International Congress & Expo, IEEE*, New Realities: Authenticity & Automation in the Digital Age, pages 1–4, San Francisco, United States, October 2018.
- [LGL⁺20] Flavien Lécuyer, Valérie Gouranton, Aurélien Lamerclerie, Adrien Reuzeau, Bruno Arnaldi, and Benoît Caillaud. Unveiling the implicit knowledge, one scenario at a time. *The Visual Computer*, pages 1–12, 2020.
- [LGLM⁺17] Benoît Le Gouis, François Lehericey, Maud Marchal, Bruno Arnaldi, Valérie Gouranton, and Anatole Lécuyer. Haptic Rendering of FEM-based Tearing Simulation using Clusterized Collision Detection. In *WHC 2017 - IEEE World Haptics Conference*, pages 406–411, Munich, Germany, June 2017.
- [LGR⁺19a] Flavien Lécuyer, Valérie Gouranton, Adrien Reuzeau, Ronan Gaugne, and Bruno Arnaldi. Authoring AR Interaction by AR. In *International Conference on Artificial Reality and Telexistence - Eurographics Symposium on Virtual Environments*, Tokyo, Japan, 2019.
- [LGR⁺19b] Flavien Lécuyer, Valérie Gouranton, Adrien Reuzeau, Ronan Gaugne, and Bruno Arnaldi. Create by doing – action sequencing in vr. In Marina Gavrilova, Jian Chang, Nadia Magnenat Thalmann, Eckhard Hitzler, and Hiroshi Ishikawa, editors, *CGI 2019 - Computer Graphics International, Advances in Computer Graphics*, pages 329–335, Calgary, Canada, June 2019. Springer International Publishing.
- [LGR⁺20] Flavien Lécuyer, Valérie Gouranton, Adrien Reuzeau, Ronan Gaugne, and Bruno Arnaldi. Action sequencing in VR, a no-code approach. *LNCS Transactions on Computational Science*, pages 57–76, 2020.
- [LM18] Gwendal Le Moulec. *Synthèse d’applications de réalité virtuelle à partir de modèles*. PhD thesis, INSA Rennes, 2018. Thèse de doctorat dirigée par Bruno Arnaldi, encadrée par Valérie Gouranton et Arnaud Blouin, Informatique Rennes.
- [LMAG⁺17] Gwendal Le Moulec, Ferran Argelaguet, Valérie Gouranton, Arnaud Blouin, and Bruno Arnaldi. AGENT: Automatic Generation of Experimental Protocol Runtime. In *ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST)*, Virtual Reality Software and Technology, Gothenburg, Sweden, November 2017.
- [LMASLG16] Gwendal Le Moulec, Ferran Argelaguet Sanz, Anatole Lécuyer, and Valérie Gouranton. Take-over control paradigms in collaborative virtual environments for training. In *ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST)*, Munich, Germany, 2016.
- [LMBGA18] Gwendal Le Moulec, Arnaud Blouin, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. Automatic Production of End User Documentation for DSLs. *Computer Languages, Systems and Structures*, 54:337–357, July 2018. Accepted for publication in COMLAN.
- [LNGA13] Thomas Lopez, Florian Nouviale, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. The Ghost in the Shell Paradigm for Virtual Agents and Users in Collaborative Virtual Environments for Training. In *VRIC 2013*, page 29, Laval, France, March 2013.

- [Lou12] Domitile Lourdeaux. *Modélisation de l'activité humaine pour la scénarisation adaptative d'environnements virtuels complexes : Des comportements cognitifs aux comportements erronés en situation dégradée*. 2012.
- [LSFK18] N. Lercari, E. Shiferaw, M. Forte, and R. Kopper. Immersive visualization and curation of archaeological heritage data: Çatalhöyük and the dig@it app. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 25:368–392, 2018.
- [Mad05] Souley Madougou. *Intégration des modélisations 3D des sciences de la Terre au sein d'environnements de réalité virtuelle à base de grappe de PC*. PhD thesis, Université d'Orléans, 2005. Thèse de doctorat dirigée par Hains, Gaétan Informatique Orléans 2005.
- [MAWD11] L.M. McKnight, S.D. Atherton-Woolham, and A.R. David. The ancient egyptian animal bio bank at the knh centre for biomedical egyptology, university of manchester. *Antiquity*, 85:329, 2011.
- [MGA07] Nicolas Mollet, Stéphanie Gerbaud, and Bruno Arnaldi. Storm: a generic interaction and behavioral model for 3D objects and humanoids in a virtual environment. In *IPT-EGVE the 13th Eurographics Symposium on Virtual Environments*, pages 95–100, 2007.
- [MK94] Paul Milgram and Fumio Kishino. A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information Systems*, E77-D(12):1321–1329, Dec 1994.
- [MS02] Michael Mateas and Andrew Stern. A behavior language for story-based believable agents. *IEEE Intelligent Systems*, 17(4):39–47, Jul 2002.
- [NFB⁺19] Ameet Nagpal, Jacob Fehl, Brittany Bickelhaupt, Maxim S. Eckmann, Brian Boies, and Jon Benfield. *Cancer Rehabilitation*, pages 363–373. Springer International Publishing, Cham, 2019.
- [NGG17] Théophane Nicolas, Ronan Gaugne, and Valérie Gouranton. Physical Digital Access Inside Archaeological Material. *ERCIM News*, 111:1–4, October 2017.
- [NGT⁺14] Théophane Nicolas, Ronan Gaugne, Cédric Tavernier, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. Preservative Approach to Study Encased Archaeological Artefacts. In *International Conference on Culturage Heritage, EuroMed, 2014*, pages 332 – 341, Lemessos, Cyprus, November 2014.
- [NGT⁺15] Théophane Nicolas, Ronan Gaugne, Cédric Tavernier, Quentin Petit, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. Touching and interacting with inaccessible cultural heritage. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 24(3), 2015.
- [NGT⁺16a] Théophane Nicolas, Ronan Gaugne, Cédric Tavernier, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. Internal 3D Printing of Intricate Structures. In Marinos Ioannides, Eleanor Fink, Antonia Moropoulou, Monika Hagedorn-Saupe, Antonella Fresca, Gunnar Liestøl, Vlatka Rajcic, and Pierre Grussenmeyer, editors, *6th International Conference on Culturage Heritage - EuroMed 2016*, volume 10058 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 432–441, Nicosia, Cyprus, October 2016.
- [NGT⁺16b] Théophane Nicolas, Ronan Gaugne, Cédric Tavernier, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. La tomographie, l'impression 3D et la réalité virtuelle au service de l'archéologie. *Les Nouvelles de l'archéologie*, (146):16–22, 2016.
- [NGT⁺17] Théophane Nicolas, Ronan Gaugne, Cedric Tavernier, Émilie Millet,

- Bernadet R Roseau, Renaud Bernadet, Bruno Arnaldi, and Valérie Gouranton. Lift the veil off the block samples from the Warcq chariot burial: CT-scan, photogrammetry, 3D printing and mixed reality. In *3D imaging in Cultural Heritage*, London, United Kingdom, November 2017.
- [NGT⁺18] Théophane Nicolas, Ronan Gaugne, Cédric Tavernier, Emilie Millet, Renaud Bernadet, and Valérie Gouranton. Lift the veil of the block samples from the Warcq chariot burial with 3D digital technologies. In *Digital Heritage 2018, 3rd International Congress & Expo, New Realities: Authenticity & Automation in the Digital Age, IEEE*, San Francisco, United States, 2018.
- [OKM15] M Otsuki, H Kuzuoka, and P Milgram. Analysis of depth perception with virtual mask in stereoscopic ar. In M. Imura, P. Figueroa, and B. Mohler, editors, *Proceedings of International Conference on Artificial Reality and Telexistence Eurographics Symposium on Virtual Environments, ICAT-EGVE*, pages 1–8, Kyoto, Japan, 2015.
- [PCC15] Julie Porteous, Fred Charles, and Marc Cavazza. Using social relationships to control narrative generation. In *Proceedings of the Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, pages 4311–4342. AAAI Press, 2015.
- [PHB⁺21] T. Porssut, Y. Hou, O. Blanke, B. Herbelin, and R. Boulic. Adapting virtual embodiment through reinforcement learning. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, (01), feb 2021.
- [PHM⁺03] Michal Ponder, Bruno Herbelin, Tom Molet, Sebastien Schertenlieb, Branislav Ulicny, George Papagiannakis, Nadia Magnenat-Thalmann, and Daniel Thalmann. Immersive vr decision training: Telling interactive stories featuring advanced virtual human simulation technologies. In *Proceedings of the Workshop on Virtual Environments 2003, EGVE '03*, pages 97–106, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [PLGP⁺18] Catherine Pons Lelardeux, Michel Galaup, David Panzoli, Pierre Lagarrigue, and Pierre Jessel. A Method to Design a Multi-Player Educational Scenario to Make Interdisciplinary Teams Experiment Risk Management Situation in a Digital Collaborative Learning Game: A Case of Study in Healthcare. *International Journal of Engineering Pedagogy (iJEP)*, 8(2):88–100, May 2018.
- [PNG⁺19] Marie-Anne Paradis, Théophane Nicolas, Ronan Gaugne, Jean-Baptiste Barreau, Réginald Auger, and Valérie Gouranton. Making virtual archeology great again (without scientific compromise). In Gonzalez-Aguilera D.Remondino F.Toschi I.Rodriguez-Gonzalvez P.Stathopoulou E., editor, *27th CIPA International Symposium - Documenting the Past for a Better Future*, volume 42, pages 879–886, Ávila, Spain, September 2019. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- [PT11] Laia Pujol-Tost. Realism in Virtual Reality applications for Cultural Heritage. *International Journal of Virtual Reality*, 10(3):41, 09 2011.
- [PTJ94] Ken Pimentel, Kevin Teixeira, and Denis Jamet. *La réalité virtuelle...: de l'autre côté du miroir*. Ed. Addison-Wesley, 1994.
- [QBEC03] Ronan Querrec, Cédric Buche, Maffre Eric, and Pierre Chevaillier. Sécurévi: virtual environments for fire-fighting training. In *In 5th virtual reality international conference (VRIC)*, pages 169–175, 2003.
- [Rei90] Paul Reilly. Towards a virtual archaeology. In *Computer Applications in Archaeology*, pages 133–139. Oxford: British Archaeological Reports, 1990.

- [RHB20] Marie-Stéphanie Reminiac-Houssais (Bracq). *Évaluation des compétences non-techniques des infirmières de bloc opératoire dans un environnement d'apprentissage virtuel et collaboratif*. PhD thesis, 2020. Thèse de doctorat dirigée par Michinov, Estelle et Jannin, Pierre Psychologie Rennes 2 2020.
- [RL08] A. B. Raij and B. C. Lok. Ipsviz: An after-action review tool for human-virtual human experiences. In *2008 IEEE Virtual Reality Conference*, pages 91–98, 2008.
- [RMCSB20] Giuseppe Riva, Valentina Mancuso, Silvia Cavedoni, and Chiara Stramba-Badiale. Virtual reality in neurorehabilitation: a review of its effects on multiple cognitive domains. *Expert Review of Medical Devices*, 17(10):1035–1061, 2020. PMID: 32962433.
- [RRL⁺14] Brett Ridel, Patrick Reuter, Jeremy Laviole, Nicolas Mellado, Nadine Couture, and Xavier Granier. The Revealing Flashlight: Interactive Spatial Augmented Reality for Detail Exploration of Cultural Heritage Artifacts. *J. Comput. Cult. Herit.*, 7(2):6:1–6:18, June 2014.
- [SBG⁺16] Etienne Safa, Jean-Baptiste Barreau, Ronan Gaugne, Wandrille Duchemin, Jean-Daniel Talma, Bruno Arnaldi, Georges Dumont, and Valérie Gouranton. Digital and handcrafting processes applied to sound-studies of archaeological bone flutes. In *International Conference on Culturage Heritage, EuroMed*, pages 184–195, Nicosia, Cyprus, 2016.
- [Sch06] Vincent Schmitt. Flip-flop nets. volume 1046, pages 515–528, 01 2006.
- [SLGA12] Andrés Saraos Luna, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. Collaborative Virtual Environments For Training: A Unified Interaction Model For Real Humans And Virtual Humans. In *International Conference on Serious Games and Edutainment*, pages 1–12, Germany, 2012.
- [SLGLA13] Andrés Saraos Luna, Valérie Gouranton, Thomas Lopez, and Bruno Arnaldi. The Perceptive Puppet: Seamless Embodiment Exchange Between Real and Virtual Humans in Virtual Environments for Training. In *GRAPP, International Conference on Computer Graphics Theory and Applications*, pages 1–6, Barcelone, Spain, February 2013.
- [SNGG14] Laurent S. R. Simon, Florian Nouviale, Ronan Gaugne, and Valérie Gouranton. Sonic interaction with a virtual orchestra of factory machinery. In *Sonic Interaction for Virtual Environments*, pages 1–6, Minneapolis, United States, March 2014.
- [Ter20] Romain Terrier. *Support à la conception collaborative en Réalité Virtuelle : du Framework basé scénarios aux interactions*. PhD thesis, INSA Rennes, 2020. Thèse de doctorat dirigée par Bruno Arnaldi et Nico Pallamin, encadrée par Valérie Gouranton.
- [TGB⁺20] Romain Terrier, Valérie Gouranton, Cédric Bach, Nico Pallamin, and Bruno Arnaldi. Scenario-based VR Framework for Product Design. In *VISIGRAPP, GRAPP, the 15th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*, Valletta, Malta, 2020.
- [TGB⁺21] Romain Terrier, Valérie Gouranton, Cédric Bach, Nico Pallamin, and Bruno Arnaldi. Scenario-based VR application for collaborative design. In A. Augusto de Sousa, Vlastimil Havran, José Braz, and Kadi Bouatouch, editors, *Proceedings of the 16th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and*

- Applications, VISIGRAPP 2021, Volume 1: GRAPP, Online Streaming, February 8-10, 2021*, pages 237–244. SCITEPRESS, 2021.
- [TML⁺19] Romain Terrier, Nicolas Martin, Jérémy Lacoche, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. Am I better in VR with a real audience? In *CGI 2019 - Computer Graphics International*, pages 28–39, Calgary, Canada, June 2019. Springer.
- [TML⁺20] Romain Terrier, Nicolas Martin, Jérémy Lacoche, Valérie Gouranton, and Bruno Arnaldi. Do Distant or Colocated Audiences Affect User Activity in VR? In *Transactions on Computational Science XXXVII: Special Issue on Computer Graphics*, pages 1–18. Marina L. Gavrilova, C. J. Kenneth Tan, Jian Chang, Nadia Magnenat Thalmann, July 2020.
- [VDP⁺21] Guillaume Vailland, Louise Devigne, François Pasteau, Florian Nouviale, Bastien Fraudet, Emilie Leblong, Marie Babel, and Valérie Gouranton. VR based Power Wheelchair Simulator: Usability Evaluation through a Clinically Validated Task with Regular Users. In *VR 2021 -Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces*, pages 1–8, Lisbon, Portugal, March 2021. IEEE.
- [Ver11] Robert Vergnienx. Archaeological research and 3d models (restitution, validation and simulation). *Virtual Archaeology Review*, 2(4):39–43, 2011.
- [VFLJ02] Eileen Vote, Daniel Acevedo Feliz, David H. Laidlaw, and Martha Sharp Joukowsky. Discovering petra: Archaeological analysis in vr. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 22(5):38–50, September 2002.
- [VGB21] Guillaume Vailland, Valérie Gouranton, and Marie Babel. Cubic Bézier Local Path Planner for Non-holonomic Feasible and Comfortable Path Generation. In *ICRA 2021 - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 7894–7900, Xian, China, May 2021. IEEE.
- [VGD⁺19] Guillaume Vailland, Fabien Grzeskowiak, Louise Devigne, Yoren Gaffary, Bastien Fraudet, Emilie Leblong, Florian Nouviale, François Pasteau, Ronan Le Breton, Sylvain Guegan, Valérie Gouranton, Bruno Arnaldi, and Marie Babel. User-centered design of a multisensory power wheelchair simulator: towards training and rehabilitation applications. In *ICORR 2019 - International Conference on Rehabilitation Robotics*, pages 1–6, Toronto, Canada, June 2019.
- [VGD⁺20a] Guillaume Vailland, Yoren Gaffary, Louise Devigne, Valérie Gouranton, Bruno Arnaldi, and Marie Babel. Power Wheelchair Virtual Reality Simulator with Vestibular Feedback. *Modelling, measurement and control C*, 81:35 – 42, December 2020.
- [VGD⁺20b] Guillaume Vailland, Yoren Gaffary, Louise Devigne, Valérie Gouranton, Bruno Arnaldi, and Marie Babel. Vestibular Feedback on a Virtual Reality Wheelchair Driving Simulator: A Pilot Study. In *HRI 2020 - ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, Cambridge, United Kingdom, March 2020.
- [VT09] Robert Vergnienx and Premio Tartessos. L’usage scientifique des modèles 3d en archéologie: De la validation à la simulation. *Virtual Archaeology Review*, 2(4):39–43, 2009.
- [VTX12] V. Venkatesh, J.Y.L. Thong, and X. Xu. Consumer acceptance and use of information technology: extending the unified theory of acceptance and use of technology. *MIS Quarterly*, 36(1):157–178, 2012.

Annexe A

Annexe : projets de recherche

A.1 Projets internationaux

- **INTERREG France-Manche (2017-2021)**

Technologies d’assistance et d’autonomisation des personnes dépendantes à partir de solutions robotiques et de réalité virtuelle.

Partenaires principaux : Pôle Saint-Hélier, équipe de robotique Rainbow et équipe mécanique de l’INSA Rennes.

Partie RV : Financement d’un doctorant et d’ingénieur 48h.mois.

- **ANR-FRQSC France-Québec INTROSPECT (2016-2021)**

Introspection du mobilier archéologique à l’ère du numérique.

Partenaires : INSA Rennes (coordination), Université Rennes 1, CNRS, Inrap, Université Laval (Québec), INRS (Québec), ENS Rennes, Image ET.

Financement d’un doctorant et d’ingénieur 12h.mois.

- **Labex CominLabs International SUNSET (2019-2020)**

Procédures de formation en neuro-chirurgie à l’international

Partenaires : LTSI/Inserm, INSA Rennes, IRISA, Inria, LP3C, CHU Rennes.

Financement d’ingénieurs 24h.mois

- **INFRA VISIONAIR (2011-2015)**

réseaux de plateformes de recherche pour la visualisation 3D

Financement de projets invités

A.2 Projets nationaux

- **CNRS Imag'in IRMA (2015-2016)**

Imageries et inteRactions Multi-modales pour l'Archéologie.

Partenaires : INSA Rennes (coordinateur), Inrap, Université Rennes 1, CNRS, société Image ET.

Financement de matériel et prestations.

- **FUI PREVIZ (2013-2015)**

Pré-visualisation, répétition pour les acteurs et le réalisateur en Réalité Virtuelle avec effets spéciaux, on-set.

Partenaires : Technicolor (coordinateur), INSA Rennes, ENS Louis Lumière, LIRIS, GIPSA-LAB, Ubisoft, Solidanim, Loumasystems, Polymorph.

Financement d'ingénieurs 48h.mois

- **FUI SIFORAS (2011-2014)**

Formation dans le domaine industriel en Réalité Virtuelle.

Partenaires : Nexter Training (coordinateur), INSA Rennes, ENIB, CEA LIST, VIRTUALYS, DELTACAD, DAF Conseils, ALSTROM Transport, DCNS, DELPHI, Nexter Systems, Renault, SNCF. Label pôle Images & Réseaux.

Financement d'ingénieurs 24h.mois

- **ANR CORVETTE (2010-2014)**

Formation collaborative en Réalité Virtuelle dans le domaine de l'industrie.

Partenaires : INSA Rennes (coordination), ENIB, CEA LIST, GOLAEM, VIRTUALYS, Nexter Training. Label pôle Images & Réseaux.

Financement d'un doctorant et d'ingénieurs 36h.mois.

- **ANR COLLAVIZ (2008-2012)**

Développement d'une plate-forme de collaboration distante pour la visualisation scientifique, multi domaines pre/post processing.

Partenaires : Oxalya (coordinateur) ECP, INSA Rennes, LIRIS, Scilab, EGID, INPT, Artenum, Distene, MCLP consulting, TechViz, BRGM, EDF, Faurecia, Medit, Necs, Teractec.

Financement d'un doctorant sur 3 ans et demi et d'un ingénieur 9h.mois.

- **RNTL Geobench (2002-2005)**

Visualisation immersive de données (géo)scientifiques à travers le prototypage d'un environnement de visualisation scientifique.

Partenaires : BRGM (coordinateur), l'INRIA Grenoble, le CEA et Mercury (ancien-nement TGS Europe).

Financement d'ingénieurs 24 h.mois.

A.3 Projets locaux

- **Projet appel Inria, VERARE (2019-2020)**

La réalité virtuelle au service de la rééducation des patients atteints du Covid-19, VERARE.

Partenaires : Inria-Rennes, service de Médecine Physique et de Réadaptation du CHU de Rennes.

Financement d'un Post-doc 18h.mois

- **Labex CominLabs RobotX (2019)**

Procédures de formation en neuro-chirurgie pour des compétences techniques et non techniques avec un robot.

Partenaires : LTSI/Inserm, INSA Rennes, IRISA, Inria, LP3C, Université de Nantes, IMT, CNRS, CHU Rennes et Nantes, ICO (Institut du Cancer de l'Ouest),

Financement d'ingénieurs 2 h.mois

- **Labex CominLabs SUNSET (2016-2019)**

Procédures de formation en neuro-chirurgie pour des compétences non techniques.

Partenaires : LTSI/Inserm, INSA Rennes, IRISA, Inria, LP3C, CHU Rennes.

Financement d'un doctorant et d'ingénieurs 36h.mois

- **Chaire de la Fondation Rennes 1 Partage (2017-2020)**

Contribution à la transition numérique pour le patrimoine archéologique et historique.

- **IRT b<>com, projet SmatCave, (2017-2020)**

Perception collaborative sous casque de réalité virtuelle

Mise à disposition de 20% (1 journée par semaine),

Financement d'un doctorant

- **Maturation SATT (2017-2019)**

#SEVEN #FIVE : Outils logiciels de conception d'environnements virtuels interactifs et collaboratifs.

Financement d'ingénieurs 54h.mois

- **Projet Rennes-Métropole, Chat alors ! (2018)**

projet appel Créativité Croisée, tomodensitométrie et impression 3D transparente de la momie de chat du musée des Beaux-Arts de Rennes.

Partenaires : Université Rennes 1, INSA Rennes, l'Inrap et Musée des Beaux-Arts de Rennes

- **IRT b<>com, projet ImData, (2013-2016)**

Développement de solutions de navigation et d'interaction en milieu immersif dans des grandes quantités de données.

Mise à disposition de 20% (1 journée par semaine),

Financement d'un doctorant

- **Labex CominLabs S3PM (2013-2015)**

Procédures de formation en neuro-chirurgie

Partenaires : LTSI/Inserm, INSA Rennes, IRISA, Inria, CHU Rennes,

Financement d'un doctorant

A.4 Projets bi-latéraux

- **Contrat NEXTER Training (2008-2010)**

Partenaires : GVT-Nexter Training, Inria-Rennes.

Développement d'un logiciel de formation collaborative,

Financement d'ingénieur de recherche 33h.mois.

Annexe B

Annexe : encadrement

B.1 Doctorants

Doctorants en cours (3)

- Emilie Hummel (encadrement 25%, Mélanie Cogné 25%, Florence Joly (Co-Dir. Caen) 25%, Anatole Lécuyer (Co-Dir.) 25%), Design of Virtual Reality Systems for Rehabilitation of Cancer Related Cognitive Impairments, bourse Inria-Inserm, début oct. 2021
- Vincent Goupil (encadrement 33%, Bruno Arnaldi (Co-Dir.) 33%, Anne-Solène Michaud (Co-Dir. Vinci) 33%), Hôpital 2.0 : Génération d’applications de Réalité Virtuelle, un modèle de signalétique Sogea Bretagne/Vinci Construction, CIFRE, début oct. 2020.
- Lysa Gramoli (encadrement 25%, Anthony Foulonneau 25% (Orange), Jérémy Lacoche (Co-Dir. Orange) 25%, Bruno Arnaldi (Co-Dir.) 25%), Simulation d’agents autonomes dans des environnements virtuels connectés, Contrat Orange Labs, début oct. 2020, 1 publication internationale [GLF⁺21]

Doctorants ayant soutenu (13)

1. Guillaume Vailland (encadrement 50%, Marie Babel (Dir.) 50%), a soutenu en déc. 2021, durée 3 ans et 1 mois, Intererg ADAPT, Navigation assistée d’un fauteuil roulant en extérieur : réelle vs virtuelle, 5 publications internationales [VDP⁺21, VGB21, VGD⁺20b, VGD⁺20a, VGD⁺19], thèse non encore disponible
2. Guillaume Bataille (encadrement 35%, Jérémy Lacoche (Co-Dir.) 30%, Bruno Arnaldi (Co-Dir.) 35%), Contrat Orange Labs, a soutenu en 3 ans, oct. 2020, Interactions Naturelles en Réalité Mixte pour l’Internet des Objets, 3 publications internationales [BGL⁺20a, BGL⁺20b, BGLA21], thèse non encore disponible
3. Romain Terrier (encadrement 35%, Nico Pallamin (Co-Dir. b<>com) 30%, Bruno Arnaldi (Co-Dir.) 35%) b<>com, a soutenu en 3 ans, oct. 2020, Présence de soi et des autres dans un environnement virtuel collaboratif, 4 publications internationales [TML⁺20, TGB⁺20, TML⁺19, TGB⁺21], thèse [Ter20]
4. Flavien Lécuyer, (encadrement 40%, Grégor Marchand (Co-Dir. CREaAH) 25%, Bruno Arnaldi (Co-Dir.) 35%), a soutenu en sept. 2020, durée 3 ans, ANR INTROSPECT, Méthodes de production d’applications de XR interactives, application à l’archéologie, 3 publications internationales [LGR⁺20, LGL⁺20, LGG⁺18, LGR⁺19a, LGR⁺19b], Thèse [Léc20]

5. Anne-Solène Dris (encadrement 50%, Bruno Arnaldi (Dir.) 50%), a soutenu en oct. 2018, durée 3 ans, thèse CIFRE, ingénieure chez Vinci Construction, Modèles abstraits pour la formation à la sécurité, application au BIM, 3 publications internationales [DLGA18a, DLGA18b, DGA16], thèse confidentielle pour 5 ans.
6. Gwendal Le Moulec (encadrement 30%, Arnaud Blouin 30%, Bruno Arnaldi (Dir.) 40%), a soutenu en sept. 2018, durée 3 ans, thèse MESR, Synthèse d'application de Réalité Virtuelle à partir de modèles. 3 publications internationales [LMAG⁺17, LMASLG16, LMBGA18], thèse [LM18]
7. Jean-Baptiste Barreau (encadrement 70%, Bruno Arnaldi (Dir.) 30%), a soutenu en juil. 2017, durée 3 ans et 6 mois, ingénieur d'études CNRS en informatique, Techniques de production, d'exploration et d'analyse d'environnements archéologiques virtuels, 9 publications internationales [SBG⁺16, BNG⁺15, BPB⁺15, BNB⁺14b, BNB⁺14a, BBP⁺14, BGB⁺13, GLCBG13, GBCG12], thèse [Bar17]
8. Guillaume Claude (encadrement 50%, Bruno Arnaldi (Dir.) 50%), a soutenu en juil. 2016, durée 3 ans, projet CominLabs S3PM. Séquencement d'actions en environnement virtuel collaboratif, 5 publications internationales [CGBBA14, CGA15b, CGA15a, CGC⁺16a, CGC⁺16b], thèse [Cla16]
9. François Lehericey (encadrement 50%, Bruno Arnaldi (Dir.) 50%), a soutenu en sept. 2016, durée 3 ans, bourse MESR. Détection de collision par lancer de rayon : la quête de la performance, 5 publications internationales [LGLM⁺17, LGA13a, LGA13b, LGA15a, LGA15b], thèse [Leh16]
10. Morgan Le Chénéchal (encadrement 25%, Thierry Duval (Co-Dir.) 25%, Jérôme Royan (Co-Dir. b <> com) 25%, Bruno Arnaldi (Co-Dir.) 25%), a soutenu en juil. 2016, durée 3 ans, IRT b <> com, projet ImData. Contributions to Asymmetric Remote Collaboration in Mixed Reality Through Activity Perception and Interaction Techniques Proposals : Application to Tele-Maintenance, 5 publications internationales [LCAD⁺14, LCCD⁺15, LCDG⁺15, LCDG⁺16, LCLR⁺16], thèse [LC16]
11. Cédric Fleury (encadrement à 50%, Thierry Duval (Dir.) 50%), a soutenu en juin 2012, durée 3 ans et 8 mois, sportif de haut niveau (SHN) d'où une durée supérieure à 36 mois pour la préparation de son doctorat, ANR COLLAVIZ. Modèles de conception pour la collaboration distante en environnements virtuels distribués : de l'architecture aux métaphores, 7 publications internationales [DDF⁺10, DNF⁺12, DNF⁺14, FCD⁺10, FDGA10a, FDGA10b, FDGS12], thèse [Fle12]
12. Quentin Avril (encadrement à 80%, Bruno Arnaldi (Dir.) 20%) a soutenu en sept. 2011, durée 3 ans, bourse ARED 100%. Détection de collision pour environnements large échelle : modèle unifié et adaptatif sur architectures multi-cœurs, multi-GPU, 5 publications internationales [AGA10, AGA11, AGA12, AGA14, DLAG13], thèse [Avr11]
13. Souley Madougou (encadrement 30%, Emmanuel Melin 30%, Gaétan Hains (Dir.) 40%), a soutenu en 2005, Contrat Région et BRGM, 2 publications internationales [GMMN05, GLMM04], thèse [Mad05]

Devenir des docteurs

1. Guillaume Vailland est co-fondateur et CTO de BlueMarket, Rennes
2. Guillaume Bataille est ingénieur de recherche, Orange Labs, Cesson-Sévigné (35)
3. Romain Terrier est en contrat l'alternance, ingénieur pédagogique chez Simango, Cesson-Sévigné (35)
4. Flavien Lécuyer est maître de conférences à l'Université de Strasbourg

5. Anne-Solène Dris-Michaud est responsable du service Ingénierie Numérique chez Vinci Construction, Rennes
6. Gwendal Le Moulec est ingénieur chez SOPRA Steria, Rennes
7. Jean-Baptiste Barreau est ingénieur de Recherche CNRS, Responsable du Pôle Numérique de la MSH, Université de Nantes
8. Guillaume Claude est ingénieur de recherche en CDD à l'École d'architecture de Rennes
9. François Lehericey est ingénieur de recherche en CDI chez Havoc, Dublin, Irlande.
10. Morgan Le Chénéchal est ingénieur chez Open Mind Innovation, Caen
11. Cédric Fleury est actuellement Maître de conférences à l'IMT Atlantique, Brest
12. Quentin Avril est actuellement chercheur en CDI chez InterDigital, responsable d'équipe.
13. Souley Madougou est actuellement ingénieur de recherche aux Pays Bas, Academic Medical Center

B.2 Post-Doc et Ingénieurs

Ingénieurs en cours (1)

- Alexandre Audinot, avril 2017- ; Cominlabs SUNSET ; CominLabs RobotX ; Interreg ADAPT

Ingénieurs-Post doc passés (16), environ 30h.ans

1. Dr Sophie Robert, de sept. 2003 à aout 2005, 2 ans, 1 publication [AGL⁺04] ; RNTL Geobench
2. Dr Stéphanie Gerbaud, d'oct. 2008 à juin 2010, 1 ans et 9 mois, 1 publication [GGA09] ; Nexter Training
3. Dr Laurent Aguerreche, de sept. 2010 à fév. 2011, 6 mois ; ANR COLLAVIZ
4. Florian Nouviale de janv. 2011 à sept. 2013, 2 ans 9 mois, 4 publications [BGB⁺15, LCG⁺14, LBBLE⁺14, LNGA13] ; ANR CORVETTE
5. Dr Thomas Lopez, de mars 2012 à juin 2014, 2 ans 4 mois, 4 publications [LCG⁺14, LBBLE⁺14, SLGLA13, LNGA13] ; FUI SIFORAS
6. Quentin Petit, de sept. 2013 à fév. 2014, 6 mois ; Contrat SIFORAS
7. Dr Rozenn Bouville-Berthelot, de février 2013 à oct. 2015, 5 publications [BGA16, BGB⁺15, LCG⁺14, LBBLE⁺14, CGBBA14] ; FUI PREVIZ
8. Thomas Boggini, de sept. 2013 à avril 2015, 1 an 7 mois ; FUI PREVIZ
9. Julian Joseph, de oct. 2013 à sept. 2015, 2 ans ; ADT Inria MAN-IP
10. Emmanuel Badier, de juillet 2014 à aout 2015, 1 an 1 mois ; FUI PREVIZ
11. Dr Guillaume Claude, sept. 2016-avril 2017, 8 mois ; CominLabs SUNSET
12. Dr Carl Jorgensen, sept. 2017-mars 2019 ; 1 an et 6 mois ; Maturation SATT
13. Vincent Goupil, sept. 2017-mars 2019 ; 1 an et 6 mois ; Maturation SATT
14. Emeric Goga, sept. 2017-mars 2019 ; 1 an et 6 mois ; Maturation SATT
15. Dr Yoren Gaffary, Oct. 2017-Sept. 2019, 2 ans ; 3 publications internationales [VGD⁺20b, VGD⁺20a, VGD⁺19] Post-Doc Interreg ADAPT
16. Adrien Reuzeau, fév. 2018- sept. 2020 ; 2 ans 7 mois Cominlabs SUNSET ; 4 publications internationales [LGR⁺20, LGL⁺20, LGR⁺19a, LGR⁺19b] ; ANR INTROSPECT

Devenir des Ingénieurs/Post

1. Sophie Robert est maître de conférences à l'Université Orléans
2. Stéphanie Gerbaud est ingénieur en SSII, Orange Business Services, Rennes.
3. Laurent Aguerreche est ingénieur chez Theoris SAS, Paris
4. Florian Nouviale est ingénieur de recherche à l'INSA Rennes
5. Thomas Lopez est chercheur en CDI chez Unity, Montréal, Canada,
6. Quentin Petit est ingénieur en CDI chez Simango en CDD
7. Rozenn Bouville est ingénieur CDI chez Dassault Systèmes depuis nov. 2015, Rennes.
8. Thomas Boggini est Ingénieur chez Clarté, Laval
9. Julian Joseph est ingénieur CDD à l'École d'architecture de Rennes
10. Emmanuel Badier est ingénieur à l'Université de Fribourg, Suisse,
11. Guillaume Claude est ingénieur CDD à l'École d'architecture de Rennes
12. Carl Jorgensen est ingénieur CDD chez Inria, équipe MimeTIC, Rennes
13. Vincent Goupil est ingénieur en CDI chez Vinci Construction France, Sogea, Rennes, et en thèse CIFRE.
14. Emeric Goga est ingénieur en CDI chez Sopra Stéria, Toulouse
15. Yoren Gaffary est responsable technique de l'offre RV/RA, Lojelis, Rennes
16. Adrien Reuzeau est ingénieur CDD chez Inria, équipe MimeTIC, Rennes