



L'interaction pédagogique dans les jeux d'apprentissage immersifs

David Panzoli

► To cite this version:

David Panzoli. L'interaction pédagogique dans les jeux d'apprentissage immersifs. Synthèse d'image et réalité virtuelle [cs.GR]. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2021. <tel-03371201>

HAL Id: tel-03371201

<https://hal.science/tel-03371201v1>

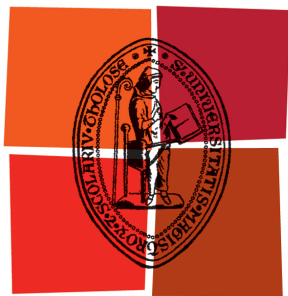
Submitted on 8 Oct 2021

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

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



HAL Authorization



Université
de Toulouse

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme

d'HABILITATION À DIRIGER LES RECHERCHES

Délivré par l'Université Toulouse III - Paul Sabatier

Présenté et soutenu publiquement par David PANZOLI

Le 16 juin 2021

L'interaction pédagogique dans les jeux d'apprentissage immersifs

JURY

Président : Pr. Jean-Pierre JESSEL, Université Toulouse Paul Sabatier

Rapporteurs : Mme. Domitile LOURDEAUX, Université de Technologie de Compiègne
Pr. Bruno ARNALDI, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes
Pr. Cédric BUCHE, École nationale d'ingénieurs de Brest

Examineurs : Pr. Sébastien GEORGE, Université du Mans
Pr. Julian ALVAREZ, Université Polytechnique des Hauts de France

Invité : Pr. Pierre LAGARRIGUE, INU Champollion Albi

Remerciements

Au sortir de cette journée de soutenance, ponctuant un long mais enrichissant travail de synthèse ainsi qu’une préparation qui fût laborieuse sur la fin (certains pourront en témoigner), mes premiers remerciements vont naturellement aux membres de mon jury pour l’honneur qu’ils m’ont rendu en rapportant ou en examinant mon travail, et pour les échanges qui ont suivi la soutenance.

Mais le travail qui figure dans les pages de ce manuscrit, et qui constitue par ailleurs le socle des expériences et des connaissances que j’ai mises en valeur aujourd’hui, est surtout un travail collectif, fruit de nombreuses collaborations ponctuelles pour certaines, plus durables pour d’autres. Pour cela, je tiens donc à remercier :

Stéphane pour bientôt vingt années (*and counting* ...) d’échanges scientifiques et d’amitié indéfectible.

Jean-Pierre pour avoir accepté de me parrainer, m’avoir soutenu et accompagné tout au long du processus.

L’équipe du *Serious Game Research Lab*, avec qui je partage mon quotidien depuis maintenant presque dix ans : Pierre pour son intelligence des trajectoires dans les « pif-pafs » ; Cathy, pour sa formidable capacité à avancer et à faire sauter les barrières ; Michel, pour son sens inné du jeu et du collectif, et ; Hervé, pour ses mises en perspective tantôt rugbystiques tantôt aériennes.

Tous les professeurs que j’ai croisé durant mes contrats et qui m’ont inspiré l’envie (chacun différemment) de rédiger mon habilitation : Yves, Hervé, Sara, Philippe, Frédéric et Frederick.

Enfin tous les gens qui figurent ci-après dans les notes de bas de page, dans les légendes ou dans les encarts, et dont le travail et l’implication mériteraient certainement plus qu’une simple mention (mais on ne peut avoir tout ce qu’on veut dans la vie) : Panos, Ian, Kévin, Guillaume, Alex, Jean-Baptiste, Thomas, Cyrielle, Jules, Olivier, Romain, Maxime, Yohan, Nicolas, Alexis, et d’autres que j’oublie sûrement.

*« Explorateurs, exploratrices
De la troisième dimension
N'ayez pas peur
Si je me glisse
Dans votre imagination. »
— Matthieu Chedid (Monde Virtuel)*

Table des matières

Chapitre 1 Introduction	9
1.1 Contexte général	9
1.2 Contexte scientifique	11
1.2.1 Les vertus de l'apprentissage immersif	11
1.2.2 La promesse de l'engagement ludique	14
1.3 Défis des jeux d'apprentissage immersifs	17
1.3.1 Définition de l'interaction pédagogique	17
1.3.2 Organisation générale du mémoire	18
1.4 Projets évoqués dans ce mémoire et encadrements	20
Chapitre 2 Numérisation et gestion des connaissances	23
2.1 Méthodologies de conception	24
2.1.1 Les rôles dans la conception d'un EVAH	24
2.1.2 Problématique de la conception collaborative	25
2.2 Représentation des connaissances	25
2.2.1 Ontologie d'un domaine	25
2.2.2 Description de l'activité	26
2.2.3 Modélisation du risque	29
2.2.4 Modélisation des processus décisionnels	30
2.3 Scénarisation pédagogique	30
2.3.1 Scénarisation et narration dynamique	30
2.3.2 Scénariser en accord avec les objectifs pédagogiques	32
2.3.3 Assistance à la scénarisation : <i>authoring</i> et PCG	34
2.4 Contributions	35
2.5 Bilan du chapitre	38

Chapitre 3 Modélisation d'un environnement virtuel de formation	41
3.1 Propriétés d'un EV3D	41
3.1.1 Dynamisme et interactivité	42
3.1.2 Intégration utilisateur et collaboration	43
3.1.3 Réalisme versus <i>fun</i>	44
3.1.4 Notion d'environnement «informé»	45
3.2 Modélisation sémantique de l'environnement	46
3.3 Environnement formateur	47
3.4 Contributions	48
3.5 Bilan du chapitre	50
Chapitre 4 Conception et ergonomie des interactions pédagogiques	51
4.1 L'espace des interactions	51
4.1.1 Immersion de l'utilisateur	52
4.1.2 Cybermaladie	56
4.2 Mise en œuvre de l'interaction	57
4.2.1 Interactions 3D et pertinence pédagogique	57
4.2.2 Manipulations physiques et métaphores d'interactions	58
4.3 Contributions	61
4.4 Bilan du chapitre	64
Chapitre 5 Intégration de la dimension sociale de l'apprentissage	67
5.1 Collaboration et coopération	68
5.2 Les personnages non joueurs	68
5.2.1 Foules virtuelles	69
5.2.2 Co-équipiers	69
5.2.3 Tuteurs pédagogiques	70
5.3 Approches centralisée et décentralisée	70
5.4 Communication verbale et non-verbale	73
5.5 Contributions	75
5.6 Bilan du chapitre	77
Chapitre 6 Collecte et analyse des traces utilisateur	79
6.1 Traces utilisateur	79
6.1.1 Indicateurs et métriques	80

6.1.2	Collecte des données	81
6.2	Évaluation de l'apprenant	81
6.3	Évaluation du jeu	84
6.4	Contributions	85
6.5	Bilan du chapitre	88
Chapitre 7 Conclusion		89
7.1	Le futur de l'apprentissage immersif	89
7.2	Projet de recherche	90
7.2.1	Proposition	93
7.2.2	Défis	94
Table des figures		99
Bibliographie		101

1 | Introduction

Les jeux d'apprentissage immersifs

Sommaire du chapitre

1.1	Contexte général	9
1.2	Contexte scientifique	11
1.2.1	Les vertus de l'apprentissage immersif	11
1.2.2	La promesse de l'engagement ludique	14
1.3	Défis des jeux d'apprentissage immersifs	17
1.3.1	Définition de l'interaction pédagogique	17
1.3.2	Organisation générale du mémoire	18
1.4	Projets évoqués dans ce mémoire et encadrements	20

1.1 Contexte général

L'inspiration générale qui anime mes travaux de recherche depuis plus de 10 ans, c'est la promesse sociale d'une transformation radicale de la manière dont les savoirs sont acquis ou transmis, grâce aux progrès des sciences et technologies. D'une part, le demi-siècle dernier a été le témoin d'un approfondissement continu de nos connaissances sur les mécanismes qui régissent la manière dont nous apprenons en tant qu'individus. D'autre part, la maturité récente des techniques de l'informatique graphique, de la réalité virtuelle, de l'intelligence artificielle et du jeu vidéo, laissent entrevoir le déploiement à grande échelle de solutions de formation et d'entraînement plus interactives, plus adaptatives, mieux personnalisées et accompagnées. Cet enjeu est particulièrement important dans une société où croissent les métiers de haute technicité, à risque ou à fort potentiel d'évolution des savoirs dans lesquels les méthodes d'enseignement ou de compagnonnage ont atteint les limites de leur efficacité. Le besoin d'explorer de nouveaux modes d'apprentissage concerne aussi bien l'enseignement des connaissances théoriques, de plus en plus complexes et difficiles pour les experts à verbaliser, que l'entraînement aux compétences pratiques, où s'appliquent des contraintes de coût, de temps, parfois même de sécurité de personnes.

En réponse à ce besoin de mutation de l'enseignement, la technologie a apporté le pouvoir de fabriquer des expériences. Ainsi, de nombreuses innovations pédagogiques ont été proposées par l'informatique dans l'optique d'intégrer activement l'utilisateur dans le

processus de construction des savoirs. À partir des années 1960, les simulateurs constituent la première contribution apportée par l'électronique, puis par l'informatique, à la transformation de l'éducation, notamment dans les domaines de l'aéronautique [Rolfe & Staples(1988)] et de la médecine [Bradley(2006)], où ils constituent encore aujourd'hui une composante très importante de la formation. À partir des années 1970, une succession d'inventions ayant pour objectif d'améliorer les représentations visuelles et les manipulations dans les simulateurs vont donner naissance à une technologie qui va rapidement dévoiler son potentiel : la réalité virtuelle (VR). Au milieu des années 1990, les usages pédagogiques de la VR fleurissent, à l'instar de MaxwellWorld qui permet de visualiser et de manipuler des champs magnétiques [Dede et al.(1996)], ou de Virtual Pompeii, qui offre la possibilité de visiter la ville de Pompéi avant l'éruption du Vésuve qui la fit disparaître [Jacobson & Vadnal(2005)], ou encore des formations immersives à la maintenance d'usines [Akiyoshi et al.(1995)] ou du télescope Hubble [Loftin et al.(1994)], etc. Les apports de l'approche VR sont étudiés et avérés, et certains prophétisent déjà la convergence entre formation et jeu vidéo [Psotka(1995)]. Dans le même temps, les algorithmes de l'intelligence artificielle envahissent progressivement ces espaces immersifs pour les rendre pédagogiquement plus dynamiques et interactifs [Rickel & Johnson(1997), Lourdeaux(2001)] par l'introduction de tuteurs virtuels pédagogiques, comme Steve [Johnson & Rickel(1997)] et/ou par l'usage d'un accompagnement personnalisé.

Même si l'apport des techniques informatiques à l'innovation pédagogique est indéniable, ce n'est que récemment que l'informatique s'est ouverte à d'autres champs disciplinaires pour proposer des solutions prenant en compte de manière plus complète les facteurs qui permettent à certaines compétences ou certaines connaissances d'être apprises plus efficacement et plus durablement. De nouveaux champs multidisciplinaires ont vu le jour et de nouveaux termes ont été inventés pour désigner ces nouveaux outils ou approches, chacun mettant l'accent sur un angle d'étude ou une propriété d'intérêt : environnement virtuel pour l'apprentissage humain [Marion(2010)] (*educational virtual environment*), environnement virtuel pour la formation [Carpentier(2015)] (*virtual training/learning environment*), jeux sérieux immersifs (par exemple dans [Loup(2017)], *immersive serious game*) ou encore jeux d'apprentissage immersifs [Muller(2019), p. 16] (*immersive learning game*).

C'est ce dernier terme (traduction littérale du terme anglais *immersive learning game*) qui sera favorisé tout au long de ce mémoire, pour sa capacité à exprimer "lexicalement" l'interdépendance de la composante immersive (*immersive learning*) et de la composante ludique (*learning game*), toutes deux au service de la pédagogie dans les projets et les travaux de recherche explorés dans ce manuscrit¹. Les sections qui suivent sont consacrées à l'exploration des composantes immersive et ludique comme objets d'intérêt scientifique.

1. Incidemment, ce terme ainsi formulé permet également d'éviter une confusion récurrente portant sur le sens du mot apprentissage, souvent confondu avec la formation professionnelle par alternance.

1.2 Contexte scientifique

Le contexte scientifique associé à la problématique de conception des jeux d'apprentissage immersifs est caractérisé par une ambivalence d'opportunités et de challenges. Les propriétés intrinsèques du jeu immersif (sections 1.2.1 et 1.2.2) sont autant de promesses d'une transformation et d'une accélération dans la transmission pédagogique. Cependant, la conception de tels univers se heurte à de nombreux verrous d'ordre pédagogiques et techniques. En effet, d'une part les modèles pédagogiques sur lesquels ce nouveau type d'apprentissage est basé sont incomplets ; et d'autre part, la mise en œuvre des environnements interactifs, la collaboration ou l'animation des personnages non joueurs sont autant de défis techniques qui ne sont encore explorés qu'à travers des initiatives éparpillées.

1.2.1 Les vertus de l'apprentissage immersif

L'immersion de l'apprenant constitue la première opportunité d'un apprentissage réussi. Elle repose principalement sur les techniques et les dispositifs de la VR. Donner une définition simple de la VR n'est pas chose aisée, car il s'agit d'un concept qui dépasse le seul cadre technologique de ses dispositifs. Jaron Lanier, considéré comme un des pères fondateurs de la réalité virtuelle, en propose dans [Lanier(2017)] une définition qui a le mérite de ne pas se prendre trop au sérieux :

VR is those big headsets that make people look ridiculous from the outside ; those who wear them radiate startled delight at what they're experiencing from the inside. It's one of the dominant clichés of science fiction. It's where war veterans overcome PTSD. The very thought of VR is the fuel for millions of late night reveries about consciousness and reality. It's one of the only ways, for the moment, to raise billions of dollars fleetly in Silicon Valley without necessarily promising to spy on everybody.

La définition la plus communément admise de la VR dans la communauté francophone est celle donnée dans [Fuchs et al.(2003), p.39] : « La finalité de la réalité virtuelle est de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensori-motrice dans un monde artificiel, qui est soit imaginaire soit symbolique, soit une simulation de certains aspects du monde réel. » Pour recentrer la question sur le contexte de l'apprentissage immersif, Slater énonce quelques propriétés qui résument bien le potentiel de la VR pour la formation et l'apprentissage [Slater & Sanchez-Vives(2016)], ou à défaut l'espoir qu'elle suscite dans la communauté :

- Elle permet de transformer l'abstrait en concret. Elle offre des opportunités pratiques, et permet d'apprendre en faisant et non en regardant.
- Elle autorise des situations dans des endroits/périodes inaccessibles, et s'abstrait lorsque c'est pertinent des règles du monde, en permettant de faire des choses impossibles autrement. Winn [Winn(1993)] fournit les exemples suivants : le rapport de taille entre l'apprenant et l'objet étudié peut être ajusté facilement pour permettre aussi bien d'entrer à l'intérieur d'un atome que de voler entre les planètes du système solaire, ou bien se promener dans des tissus neuronaux comme dans [Morehead et al.(2014)] ; des informations non perceptibles habituellement pas nos sens

peuvent être présentées de manière visible par le biais d’interfaces spécifiques ; de la même manière, l’environnement virtuel peut donner des représentations à des objets ou des événements qui n’ont pas de forme physique dans la réalité, comme le temps et l’espace dans [Mintz et al.(2001)] .

Les communautés scientifiques de la VR et de l’apprentissage par immersion peinent à en définir les contours avec exactitude, tant les concepts en jeu sont polysémiques. Fuchs [Fuchs et al.(2006)] caractérise trois niveaux d’immersion – et d’interaction – offerts par la VR : sensori-moteur, cognitif et fonctionnel. On y associe parfois un quatrième niveau, l’immersion émotionnelle vécue par l’apprenant lorsqu’il est absorbé dans un récit ou une narration, mais cette forme d’immersion n’est pas caractéristique de l’expérience en VR mais plutôt de la composante ludique. Nous y reviendrons dans la section 1.2.2. Lors de la conception d’expériences en VR, ces niveaux d’immersion représentent autant les objectifs que les moyens mis en oeuvre pour susciter chez l’utilisateur une réponse physiologique et psychologique souhaitée. D’abord, l’immersion sensori-motrice cherche à couper l’apprenant de son monde (dans une modalité au moins) pour rediriger son attention vers le monde virtuel. Les dispositifs ciblent prioritairement les sens aptes à créer des illusions crédibles : la vue en tout premier lieu, puis accessoirement l’ouïe et enfin le toucher. L’immersion cognitive mène l’utilisateur à s’approprier activement l’environnement par ses interactions jusqu’à développer une conscience virtuelle [Lecouvey et al.(2012)]. À ce stade d’immersion, on évoque la notion de présence (un concept emprunté à celui de «présence» utilisé dans la télé-opération [Sheridan(1992)]) pour justifier la possibilité de proposer des expériences qui seront perçues comme authentiques par l’apprenant et qui provoqueront des réponses authentiques. C’est le troisième niveau, l’immersion fonctionnelle.

Slater [Slater(2009)] décrit des concepts similaires en s’intéressant à la faculté exhibée par l’utilisateur immergé de fournir une réponse émotionnelle, physiologique et comportementale «comme en vrai», ce qu’il nomme *response-as-if-real*. Cette faculté est favorisée par deux illusions : *place illusion*, la sensation d’être présent dans l’espace virtuel, et *plausibility illusion*, l’illusion que ce qui arrive dans l’EV arrive réellement. Il précise dans [Slater(2018)] que ces illusions ne trompent pas réellement l’utilisateur, qui n’est jamais dupe du caractère artificiel du monde dans lequel il est immergé. Cependant, il pare ses observations de fondements théoriques qui accréditent la capacité du cerveau à engendrer néanmoins des réponses authentiques. C’est d’ailleurs une des raisons des succès de l’utilisation de la VR dans un cadre thérapeutique.

Bien qu’il soit reconnu que la VR favorise un «ancrage sensorimoteur et corporel de l’apprentissage» [Fuchs et al.(2006)], les bénéfices intrinsèques de l’usage de la VR par rapport aux autres formes d’instruction numérique ont assez rarement été quantifiés, sinon dans certains contextes bien définis [Pausch et al.(1997), Merchant et al.(2014)]. Par contre, la littérature en sciences de l’éducation documente abondamment les vertus de l’usage de la VR pour l’apprentissage [Youngblut(1998), Dawley & Dede(2014)], et notamment à travers les cadrages théoriques de l’apprentissage situé et de l’apprentissage expérientiel.

Apprentissage situé

Le cadre théorique de l'apprentissage situé [Lave & Wenger(1991)] réaffirme le rôle prépondérant que jouent les contextes social et culturel dans un apprentissage, ce qui est particulièrement vrai dans les situations professionnelles. L'abstraction des savoirs conceptuels des situations dans lesquelles ils sont mis en jeu, principe sur lequel repose par ailleurs l'éducation pour sa plus grande partie, se révèle souvent contre-productif et se traduit par une réduction de l'efficacité de l'apprentissage [Brown et al.(1989)]. Ces éléments contextuels incluent généralement les interactions avec l'environnement et avec les autres acteurs. La VR représente une opportunité d'immerger l'apprenant dans un environnement certes virtuel mais interactif, riche, crédible, et où sont même parfois simulées les relations avec les autres. D'ailleurs, une revue de littérature récente [Freina & Ott(2015)] montre qu'une majorité des applications immersives pour la formation concerne les adultes et les métiers techniques.

En réaffirmant le rôle prépondérant du contexte, l'apprentissage situé, et plus largement les théories relevant de l'approche écologique comme également la théorie de l'énaction [Maturana et al.(1994)], identifient les interactions entre l'individu et un environnement dynamique capable de réagir en réponse à chacune de ses actions comme le moyen privilégié (sinon unique) de construire ses propres connaissances. C'est cette faculté des environnements immersifs à proposer des expériences subjectives qui permet d'avancer que le constructivisme constitue le fondement théorique le plus fertile pour construire une théorie de l'apprentissage immersif [Winn(1993)]. Cette idée est développée dans la section suivante.

Constructivisme et apprentissage expérientiel

Le paradigme constructiviste s'oppose à la vision classique de l'enseignement par transmission et assimilation de concepts prédéfinis. Il vise à mettre à disposition de l'apprenant tout ce qui est nécessaire pour que ce dernier fabrique lui-même le savoir, c'est à dire selon Jonassen des situations authentiques et contextualisées (i.e. non abstraites) qui présentent des représentations multiples de la réalité ne cachant rien de sa complexité naturelle [Jonassen(1994)]. Ici encore, l'environnement immersif représente une opportunité de faire vivre virtuellement des expériences (le plus souvent au moyen de la scénarisation) à l'apprenant immergé, dans des situations qui seraient complexes à reproduire en réel pour des raisons de coût, d'échelle ou de sécurité. Le cadre théorique qui explique de quelle manière les expériences sont assimilées en connaissances ou compétences est celui de l'apprentissage expérientiel [Kolb(1984)]. Il décrit l'acquisition des savoirs comme un cycle continu, qui débute par une observation suscitant chez l'apprenant une réflexion critique et une conceptualisation, avant de le motiver à une nouvelle expérience concrète et active menant à son tour à une nouvelle observation. Les bénéfices de l'apprentissage expérientiel sont nombreux :

- En premier lieu, les représentations qui constituent les nouveaux savoirs acquis sont construites par l'apprenant lui-même, et de ce fait intégrées aux représentations pré-existantes.
- En outre, les savoirs acquis de manière contextualisée peuvent être réinvestis di-

rectement dans des situations similaires ou connexes à celle de l'apprentissage.

- Apprendre par l'expérience favorise aussi les apprentissages implicites (par opposition aux objectifs de l'apprentissage, qui sont explicites), par la répétition d'une simple exposition par exemple. Dans [Vine et al.(2012)], les auteurs rapportent de quelle manière les apprenants ont acquis de manière implicite les comportements du regard d'experts durant des séances d'entraînement sur un simulateur de chirurgie laparoscopique.
- Enfin, une des vertus supposées de l'apprentissage expérientiel est de favoriser chez l'apprenant le développement des pratiques réflexives.

En regard de ces bénéfices, la mise en œuvre des expériences favorisant l'apprentissage ne peut se faire sans respecter certaines précautions. S'il reconnaît que l'expérience est le meilleur professeur, Bowman avance que l'expérience sans la théorie peut également mener à de fausses représentations : il prend l'exemple d'un étudiant en physique qui aura observé la réfraction de la lumière des centaines de fois mais qui ne comprendra pleinement le phénomène qu'une fois qu'il aura étudié l'optique en classe [Bowman et al.(1999)]. En analysant un panel de jeux et simulateurs destinés à l'apprentissage de concepts généraux sur l'électricité, [Falloon(2019)] remarque que les sujets testés ont acquis de nombreuses idées fausses.

Les capacités d'immersion d'un environnement virtuel le dotent d'un potentiel réel pour l'apprentissage. Par leurs représentations graphiques, leurs narrations, par leur interactivité, les jeux d'apprentissage proposent à leur tour leur propre interprétation de l'immersion, que [Jennett et al.(2008)] résument par «un engagement dans le jeu qui cause une absence de conscience du temps et du monde réel, en même temps qu'une sensation de présence dans l'environnement de la tâche». Ces phénomènes sont explorés dans la section suivante.

1.2.2 La promesse de l'engagement ludique

Les jeux d'apprentissage sont avant tout des outils destinés à la transmission de savoirs. Cependant, dans leur forme, ils ont bénéficié d'un traitement particulier, qu'on résume parfois par ludification ou *gamification*, qui consiste à incorporer des éléments relevant normalement de la conception vidéoludique. Il existe de nombreuses techniques de conception vidéo-ludique (ou *game design*) qui vont des mécaniques de type arcade (le cadre conceptuel *Octalysis* développé par le conférencier You-Kai Chou identifie huit puissants leviers de motivation activés grâce à des ressorts vidéoludiques simples [Chou(2015)]) à l'intégration d'une véritable narration avec une histoire convaincante, mettant parfois en scène des personnages au *background* travaillé. L'idée générale, encore souvent implémentée de manière empirique, consiste à susciter l'engagement du joueur. Cette approche est d'autant plus pertinente que la consommation de jeu vidéo, jadis réservée aux adolescents de sexe masculin, s'étend désormais à tous les genres, à tous les âges et à toutes les

catégories socio-professionnelles².

L'approche a fait l'objet de nombreux travaux, dont certains très influents [Gee(2003), Squire & Jenkins(2003)], mais qui n'ont pas permis d'en établir les bénéfices de manière consensuelle dans la communauté. [Brown & Cairns(2004)] identifient trois niveaux d'implication d'un joueur dans un jeu vidéo (l'engagement, puis la concentration, et enfin l'immersion totale) à partir desquels ils essayent de déduire des règles de conception applicables. Enfin, certains travaux tentent de recourir à des interfaces neuronales pour mesurer l'engagement ou l'immersion à partir des états mentaux du joueur durant le jeu [Kerous et al.(2018)].

Engagement et motivation dans les jeux vidéo

En 2009, Fenouillet constatait que les théories existantes de la motivation étaient aptes à fournir des cadres exploitables pour la conception de jeux d'apprentissage [Fenouillet et al.(2009)]. [Deci & Ryan(2000)] distinguent la motivation intrinsèque de pratiquer l'activité en question librement et pour le seul plaisir de pratiquer, de la motivation extrinsèque qui fait intervenir d'autres facteurs comme une contrainte (devoir, obligation) un intérêt (compétition, rémunération, etc). Selon [Malone(1987)], la motivation intrinsèque peut être provoquée dès la conception grâce à quatre leviers :

Le défi proposé doit être compris clairement par le joueur, et il doit être savamment dosé pour ne créer ni frustration lorsqu'il est trop relevé ou que le joueur pense son échec certain, ni ennui dans le cas contraire.

La curiosité est une caractéristique humaine universelle qui doit être attisée chez le joueur par l'usage de l'incertitude, la nouveauté, du changement, etc.

Le contrôle du déroulement du jeu par les actions du joueur ne doit pas pouvoir être douté ou remis en question par le joueur.

La fantaisie des univers possibles, de leurs représentations fantastiques ou réalistes et de leurs règles sans limite pour l'imagination, doit permettre la mise en scène de situations pédagogiquement pertinentes et émotionnellement impliquantes.

D'autres modèles offrent un regard alternatif sur les leviers de la motivation dans les jeux. [Keller(2000)] propose un modèle alternatif, baptisé ARCS – pour attention, pertinence, confiance et satisfaction – qu'il estime mieux en mesure d'assister concrètement à la conception des éléments motivationnels d'un jeu d'apprentissage. [Lazzaro(2004)] identifie également quatre motivations essentielles³ pour un joueur : la motivation de l'accomplissement, de l'exploration, de la récompense et du jeu social (compétition, coopération, jouer avec des amis).

Si la motivation représente indubitablement un bénéfice avéré de l'approche jeu d'apprentissage, Fenouillet constate qu'il n'en constitue pas pour autant une garantie de suc-

2. «Les pratiques de consommation des jeux vidéo des Français», CNC-TNS-Sofres, Les études du CNC, octobre 2014. https://www.cnc.fr/jeu-video/etudes-et-rapports/etudes-prospectives/les-pratiques-de-consommation-de-jeux-video-des-francais_211656

3. Les modèles diffèrent mais une règle de quatre piliers semble s'être institutionnalisée chez les théoriciens de la motivation.

cès, mais que les jeux d'apprentissage n'apportent pas toujours les résultats escomptés, faute d'un accompagnement suffisant du joueur [Fenouillet et al.(2009)]. Il en conclut que la motivation du joueur doit surtout être perçue comme le point d'entrée d'un cercle vertueux qui ne repose pas uniquement sur la motivation de l'apprenant.

Plaisir et théorie du *flow*

Une autre façon d'apprécier le bénéfice de l'approche ludique est de s'intéresser au plaisir ressenti par le joueur durant l'activité de jeu, ce qui constitue aussi une façon indirecte d'estimer son engagement. Le modèle *GameFlow* [Sweetser & Wyeth(2005)] regroupe, sous la forme d'un cadre de conception et d'évaluation, plusieurs heuristiques liées au plaisir vidéoludique structurées autour de la notion du *flow*, mise évidence en 1975 par Mihály Csíkszentmihályi⁴ [Csikszentmihalyi(1997)]. Cette notion, qu'on traduit en français par «expérience optimale», caractérise l'état mental d'un individu (sans condition d'âge, de genre, etc.) happé cognitivement dans la tâche qui l'occupe et démontrant ainsi une concentration totale, imperméable aux distractions extérieures et inconscient du temps qui passe. Cet état a été mis en évidence lors de la pratique d'activités (sportives, artistiques, et bien entendu vidéoludiques) lorsque les exigences de la tâche sont en adéquation parfaite avec les capacités de l'individu, c'est à dire dans la zone de *flow*, qui se situe entre l'ennui d'un défi trop bas et la frustration d'un défi trop relevé. On prête à l'expérience optimale de nombreux effets positifs : motivation, meilleure performance [Jackson & Csikszentmihalyi(1999)] et apprentissage accéléré⁵. Ce dernier point, bien qu'il soit de plus en plus questionné par le côté obscur du *flow* [Heutte(2020)], représente le bénéfice le plus séduisant pour un jeu d'apprentissage. D'autant plus que des principes de conception ont été développés en parallèle à la théorie, dans lesquels sont identifiés des facteurs qui influent ou affectent l'apparition du *flow*. Selon [Pausch et al.(1994)] : la définition d'objectifs clairs ; des rétroactions immédiates, qui informent le joueur quant à sa progression vers ces objectifs ; l'ajustement de la difficulté légèrement au delà de ses compétences. Le jeu *flOw* [Chen(2001)] constitue d'ailleurs une preuve de la possibilité d'intégrer la théorie du *flow* comme guide de conception d'un jeu.

En résumé de cette section, les cadres scientifiques associés à l'apprentissage immersif et aux jeux d'apprentissage constituent des opportunités de concevoir des outils réellement innovants pédagogiquement. Les différentes formes de l'immersion, qu'elle soit sensori-motrice pour communiquer un sentiment de présence, cognitive pour donner du sens aux interactions entre l'apprenant et l'outil ou émotionnelle pour susciter l'engagement par l'écriture, la scénarisation ou d'autres mécanismes de *gamification*, contribuent toutes à impacter positivement la signifiante des expériences proposées et l'engagement de l'apprenant dans l'activité d'apprentissage. Cependant, pour concrétiser ces opportunités,

4. Prononcer «chic-sainte-mi-äie-i»

5. On pourra d'ailleurs remarquer une certaine proximité entre la zone de *flow* et le concept de zone proximale de développement, théorisé par Lev Vygotsky [Vygotsky(1978)] pour caractériser cette zone dans le processus du développement de l'enfant, à l'intérieur de laquelle l'apprentissage est optimal, et qui est bordée par les connaissances ou les compétences que l'enfant maîtrise déjà celles qu'il n'est pas encore en mesure d'atteindre

des défis doivent être relevés par la communauté scientifique.

1.3 Défis des jeux d'apprentissage immersifs

Les défis sont nombreux et ils portent autant sur les méthodologies à appliquer (pour la conception, pour l'évaluation) que sur les technologies et les techniques permettant la mise en œuvre de l'outil. Ils jalonnent donc l'intégralité du cycle de vie d'un jeu d'apprentissage immersif, depuis la phase du recueil des données en amont de la conception jusqu'à l'évaluation de l'outil et surtout des connaissances et compétences nouvellement acquises par l'apprenant et leur transposition dans le monde réel.

J'ai choisi de structurer ce mémoire en consacrant un chapitre à chaque étape de ce processus. J'ai également pris le parti d'aborder chaque chapitre sous l'angle de l'interaction pédagogique, que je définis dans la section 1.3.1. En somme, si le processus de la conception était une chaîne de fabrication, alors l'interaction pédagogique serait la matière première, à partir de laquelle est fabriqué le produit qu'est le jeu d'apprentissage immersif. L'interaction pédagogique est donc au cœur de la problématique de chaque chapitre du plan présenté en section 1.3.2, et nous décrivons les transformations et les attentions qu'elle subit tout au long du processus.

1.3.1 Définition de l'interaction pédagogique

Dans ce mémoire, j'ai choisi d'aborder la problématique générale du jeu d'apprentissage immersif sous l'angle de l'interaction pédagogique. Que l'on se place du point de vue de l'expérience ludique ou de celui de l'immersion dans un environnement virtuel, ce sont les interactions entre l'apprenant et le dispositif qui permettent, favorisent et valorisent la transmission pédagogique. Du point de vue du formateur, ainsi que celui du chercheur, l'interaction est dans la majorité des cas le seul observable des processus cognitifs mis en œuvre par l'apprenant (décisions, intentions, stratégies, etc.) et par conséquent le seul moyen d'attester pour le premier de la réalisation des objectifs de la formation et pour le second de la qualité de l'outil.

[Bowman et al.(2004)] constitue toujours la référence pour la conception des interactions dans les interfaces 3D. Cet ouvrage exhaustif, à vocation résolument pratique, décrit et catégorise un vaste choix de techniques d'interaction 3D pour les environnements et les jeux. Sous l'angle des IHM 3D, sont abordés de manière détaillée les différents moyens de se déplacer dans un environnement, de manipuler des objets à l'écran ou de contrôler l'application. Outre les considérations ergonomiques, on prête à l'interaction une portée plus large que la manipulation seule d'une interface. Plus pragmatique, le modèle 3I² met en avant une approche sensorimotrice de la perception qui «replace le processus d'interaction au cœur du phénomène d'immersion» [Auvray & Fuchs(2007)]. L'interaction est perçue comme élément constitutif d'une perception active [Gibson(1979)] de l'individu, à l'origine de son appropriation du monde. Il en découle que les phénomènes de présence et d'immersion, dont nous avons discuté les vertus dans les sections précédentes, sont le

résultat d'une appropriation réussie de l'outil.

Quelles sont les propriétés particulières de l'interaction pédagogique ? En plus de permettre la manipulation efficace de l'environnement de formation, et ce faisant de participer à une immersion réussie de l'apprenant, l'interaction pédagogique porte une dimension relative à la tâche.

Les implications sont nombreuses, et discutées dans les chapitres de ce mémoire. Succinctement, nous présentons les deux considérations suivantes :

- Sa conception et sa mise en œuvre intègrent une pertinence pédagogique qui peut être éloignée des considérations ergonomiques, parfois même contradictoire : En effet, le moyen le plus efficace d'effectuer la tâche dans l'environnement peut se révéler peu pertinent vis à vis des objectifs. Par exemple, dans un jeu d'apprentissage immersif situé dans un atelier virtuel de génie mécanique, permettre à l'apprenant de se téléporter d'une machine-outil à une autre est le moyen le plus efficace et confortable de se déplacer. Néanmoins, ce choix écarte l'objectif qui consiste à apprendre à respecter les zones de danger autour de certaines machines signalées au sol dans l'atelier.
- En vue de son évaluation, l'interaction pédagogique doit permettre dans sa réalisation de mettre en évidence (seule ou de manière agrégée) un comportement attendu ou révélateur. La maîtrise de l'environnement par l'apprenant n'est pas nécessairement révélateur de sa maîtrise des tâches pédagogiques, et peut parfois même révéler de grossiers raccourcis dans le scénario pédagogique ou manquements aux objectifs.

Un dernier point, qui a été mis en évidence à plusieurs reprises, prend en compte le surcroît de la charge cognitive de l'utilisateur en situation d'apprentissage dans l'environnement 3D. Certains facteurs dont on a vu dans les sections précédentes qu'ils jouaient un rôle positif dans l'immersion, comme une richesse importante ou un rythme élevé des interactions, pourraient constituer une surcharge cognitive contre-productive pour l'utilisateur en situation d'apprentissage [Knight & Tlauka(2017), Moreno & Valdez(2005)]. Ces craintes ne sont pas toujours avérées expérimentalement et les utilisateurs se prononcent plutôt en faveur d'environnements riches [Zhang et al.(2019)].

1.3.2 Organisation générale du mémoire

L'ordre des chapitres suit une logique de progression dans la conception, la réalisation et la mise en œuvre de l'outil, qui aboutit idéalement à son évaluation. Chaque chapitre aborde les problématiques récurrentes sous la forme d'un état de l'art structuré autour de l'interaction pédagogique.

Penser ou recenser les interactions pédagogiques

La première étape dans la construction d'un jeu immersif consiste, dans le respect des objectifs identifiés de l'apprentissage ou de la formation, en un recensement des interactions entre l'apprenant et le sujet abordé. Qu'il s'agisse de se familiariser avec un contexte, d'apprendre un geste technique, ou bien encore d'acquérir un comportement ou

des bonnes pratiques, la matière première du projet peut se résumer à ce stade à une collection d'interactions pédagogiques, existantes/observées ou fictives/pensées. Dans le chapitre 2, nous abordons ainsi la nécessaire tâche de numérisation des connaissances, qui vise à décrire, schématiser, abstraire les interactions pour en fournir une représentation informatique exploitable par le programme.

Scénariser les interactions pédagogiques

Dans le chapitre 3, nous abordons la question de la scénarisation des interactions pédagogiques, c'est à dire assez littéralement leur mise en œuvre dans la scène interactive que constitue l'environnement immersif du jeu. La scénarisation de ces interactions, partie intégrante de la construction des savoirs dans un environnement dynamique, doit faire l'objet de toutes les attentions lors de la conception car les (nombreux) choix qui seront réalisés dans cette étape de la conception auront un impact crucial sur les étapes suivantes, et *in fine* sur la capacité du jeu à atteindre ses objectifs.

Planter les interactions pédagogiques

Dans le chapitre 4, on explore les techniques permettant d'implanter les interactions pédagogiques dans l'environnement 3D du jeu immersif. Interaction avec tous les éléments statiques qui composent l'environnement immersif (les interactions avec les personnages étant traitées dans le chapitre suivant) : les lieux (déplacements, etc.), les objets (manipulation, création) et les informations (collecte, analyse, etc).

Interactions pédagogiques avec les personnages non joueurs

Dans le chapitre 5, nous nous intéressons à la dimension sociale de l'apprentissage, en étudiant de quelle manière le contenu peut être transmis par l'intermédiaire de personnages virtuels jouant le rôle d'adversaires, d'équipiers ou de tuteurs intelligents. C'est particulièrement les techniques de l'intelligence artificielle qui permettent l'animation des personnages ou l'adaptativité du scénario à l'égard du joueur que nous décrivons dans ce chapitre.

Observer et analyser l'interaction pédagogique

Dans ce 6^{ème} et avant-dernier chapitre, nous considérons l'interaction pédagogique comme un moyen privilégié d'évaluation du joueur ou du jeu immersif lui-même. Nous décrivons les techniques qui permettent de collecter les traces de ces interactions, et de les analyser dans l'objectif de fournir des mesures objectives et quantitatives d'utilité ou d'utilisabilité du jeu immersif.

1.4 Projets évoqués dans ce mémoire et encadrements

Les tableaux ci-dessous récapitulent les projets de recherche auxquels j'ai participé et qui sont cités dans ce manuscrit. Ils sont présentés par ordre chronologique et mentionnent les encadrements d'étudiants, d'ingénieurs ou de doctorants.

Ces travaux ont été réalisés durant plusieurs contrats post-doctoraux de 2009 à 2012, puis après mon recrutement en 2013 à l'Institut National Universitaire Jean-François Champollion d'Albi. C'est à l'INU Champollion que j'effectue l'essentiel de mon activité de recherche, au sein d'un groupe pluridisciplinaire appelé le *Serious Game Research Lab*⁶ (SGRL). Ce dernier regroupe plusieurs chercheurs de disciplines diverses (sous la direction de M. Galaup) qui s'intéressent collectivement à la conception et à l'évaluation de jeux sérieux pour l'apprentissage. Je suis membre permanent de l'équipe de recherche REVA⁷ (*Real Expression Artificial Life*) à l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse.

Enfin, une formation de niveau master est adossée à ce groupe de recherche à l'Université : Le master AMINJ⁸ (parcours «GAME» pour Gamification, Apprentissages, iMmersion et ingEnierie de conception). J'y intervins en tant qu'enseignant, mais également dans l'encadrement des mémoires de fin d'études ou des projets tuteurés qui y sont proposés. Page 63, mes contributions citent un projet ayant fait l'objet d'une publication dans une conférence internationale.

<i>Projet</i>	Roma Nova (2010, Serious Games Institute, Coventry)
<i>Financement</i>	Financement propre SGI
<i>Partenaires</i>	Coventry University, Rome Reborn.
<i>Activités</i>	Projet collaboratif de plusieurs chercheurs du Serious Games Institute. J'ai participé au développement d'un cadre théorique pour l'apprentissage dans un EV3D immersif historique [Panzoli et al.(2010a)][Panzoli et al.(2010c)][Panzoli et al.(2010b)] et supervisé le développement du projet.
<i>Encadrements</i>	<div> <div> K. Sauvourel G. Patinaud A. Spyropoulos </div> <div> Coordination d'une équipe de 3 étudiants de master : supervision de l'implémentation Unity du projet, du développement des ressources graphiques et des contenus pédagogiques. </div> </div>

6. <https://www.univ-jfc.fr/grp/serious-game-research-lab-sgrl>

7. <https://www.irit.fr/departement/calcul-intensif-simulation-optimisation/reva/>

8. <https://www.univ-jfc.fr/masters/audiovisuel-medias-interactifs-numeriques-jeux>

<i>Projet</i>	Format-Store (2011, LIFL, Lille)
<i>Financement</i>	Appel à projet national 2009
<i>Partenaires</i>	Idées-3Com, Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille, ENACO.
<i>Site web</i>	http://www.lifl.fr/SMAC/projects/formatstore/
<i>Activités</i>	J'ai assuré la coordination scientifique avec les partenaires du projet, en particulier l'intégration dans l'environnement des clients virtuels développés par le LIFL et la gestion adaptative de la difficulté [Mathieu et al.(2011a), Mathieu et al.(2013)].
<i>Encadrements</i>	<div> <div>Jean-Baptiste Leroy</div> <div>Supervision du travail de l'ingénieur responsable de l'implantation de la méthodologie IODA pour le contrôle des clients virtuels [Mathieu et al.(2011b), Mathieu et al.(2012)].</div> </div>

<i>Projet</i>	3D Virtual Operating Room (2016, SGRL, Albi)
<i>Financement</i>	Fonds Unique Interministériel 2011.
<i>Partenaires</i>	KTM Advance, Serious Game Research Network, Hôpitaux de Toulouse, Novamotion.
<i>Site web</i>	http://3dvor.univ-jfc.fr
<i>Activités</i>	J'ai participé au projet 3D-Virtual Operating Room, d'abord en contrat post-doctoral (2012) sous la direction de Pierre Lagarrigue et Catherine Lelardeux puis en tant qu'enseignant-chercheur (2013-2016). J'ai contribué au projet par la conception d'un environnement informé multi-joueur [Panzoli et al.(2017)] et assuré la coordination scientifique avec l'ingénierie pédagogique et l'intelligence artificielle des personnages non joueurs.

<i>Encadrements</i>	Thomas Rodsphon	Automatisation du traitement des données de scénarisation issues de l'ingénierie pédagogique pour la mise en œuvre de l'environnement multijoueur informé.
	Maxime Sanselone	Co-encadrement de la thèse de Maxime (25%) en ce qui concerne l'intégration dans l'environnement du jeu de l'algorithme MCTS contrôlant les PNJ [Sanselone et al.(2014a), Sanselone et al.(2014b)]

<i>Projet</i>	Car Diag'Adventures (2017, IRIT, Toulouse)	
<i>Financement</i>	Agile-IT (Région Midi-Pyrénées).	
<i>Partenaires</i>	ACTIA, IRIT, Serious Game Research Network.	
<i>Activités</i>	Ma participation à ce projet concerne les problématiques de la modélisation conjointe de l'activité humaine (couche métier) et des objectifs de formation (couche pédagogique).	
<i>Encadrements</i>	Yohan Duval	Co-encadrement de la thèse de Yohan (33%) sur l'intégration entre description de l'activité et des objectifs pédagogiques [Duval et al.(2015), Duval et al.(2016)].

<i>Projet</i>	Meca 3D (2019, Albi)	
<i>Financement</i>	Thèse financée par la région Occitanie.	
<i>Partenaires</i>	Institut Clément Ader, Serious Game Research Network.	
<i>Activités</i>	J'ai assuré la coordination du projet, et participé notamment à l'analyse des résultats des expérimentations menées par Nicolas Muller et Michel Galaup [Galaup et al.(2017)].	
<i>Encadrements</i>	Nicolas Muller	Co-encadrement de la thèse de Nicolas (50%) Ma contribution concerne le pilotage opérationnel des différentes expérimentations de VR qui jalonnent ce travail de recherche [Muller et al.(2017)].

2 | Numérisation et gestion des connaissances

Penser ou recenser les interactions pédagogiques

C'est par ses expériences au contact de l'environnement immersif que l'apprenant construit chaque nouveau savoir de manière autonome. Du point de vue du concepteur, chacune de ces expériences doit être pensée au service d'un objectif pédagogique et mis en scène par le biais d'un ensemble d'interactions entre l'apprenant et l'environnement, les objets et les outils qu'il contient, ou les acteurs qui y évoluent, fussent-ils d'autres joueurs ou des personnages non-joueurs. Ce chapitre s'intéresse à la première étape dans le processus de conception, qui consiste donc à recenser, expliciter et détailler ces interactions, dans le cadre de l'activité ou de la tâche. Il s'agit ensuite de leur donner une représentation numérique exploitable, qui puisse être comprise par tous, concepteur, expert, y-compris *in fine* par le programme lui-même. Enfin, l'étape de scénarisation consiste à donner une organisation logique et pédagogique à toutes ces interactions numérisées.

Sommaire du chapitre

2.1	Méthodologies de conception	24
2.1.1	Les rôles dans la conception d'un EVAH	24
2.1.2	Problématique de la conception collaborative	25
2.2	Représentation des connaissances	25
2.2.1	Ontologie d'un domaine	25
2.2.2	Description de l'activité	26
2.2.3	Modélisation du risque	29
2.2.4	Modélisation des processus décisionnels	30
2.3	Scénarisation pédagogique	30
2.3.1	Scénarisation et narration dynamique	30
2.3.2	Scénariser en accord avec les objectifs pédagogiques	32
2.3.3	Assistance à la scénarisation : <i>authoring</i> et PCG	34
2.4	Contributions	35
2.5	Bilan du chapitre	38

2.1 Méthodologies de conception

La conception d'une formation immersive suit une méthodologie qui doit être préalablement établie. Il n'en existe pas d'universelle, et les paragraphes suivants mettent en lumière une grande variété des méthodes employées et des résultats attendus. Cependant, deux points sont invariablement au cœur des préoccupations durant les phases de recueil et de modélisation :

- Les acteurs impliqués dans le processus ont des points de vue très hétérogènes et des objectifs différents, souvent non révélés.
- Les connaissances à intégrer sont le plus souvent implicites, non ou mal formalisées.

2.1.1 Les rôles dans la conception d'un EVAH

Dans le processus de conception, plusieurs rôles interviennent, chacun dans le périmètre de ses compétences propres. Les paragraphes ci-dessous détaillent les rôles les plus importants. La terminologie employée sera conservée tout au long de ce mémoire.

L'ingénieur en gestion des connaissances (ou *knowledge manager*) est responsable aussi bien du recueil des données auprès des spécialistes que des phases de numérisation voire de conception pédagogique. Il est compétent pour mener des entretiens ou analyser des documents d'entreprise ou des manuels, mais également pour produire et maintenir des représentations numériques qui pourront être utilisées telles quelles dans la suite du processus.

Le concepteur pédagogique (*instructional designer* ou *game designer*) imagine des scénarios dans lesquels l'apprenant sera confronté à des situations (tâches, décisions, incidents, crises, etc.) aptes à voir naître l'expérience et le savoir qui constituent les objectifs d'apprentissage. Son argile est l'ensemble des interactions collectées par le gestionnaire des connaissances, mais c'est sa capacité à les agencer de manière pertinente qui constitue son art.

L'expert du domaine (ou *domain expert*) connaît l'activité car il la pratique depuis de nombreuses années. Il maîtrise la procédure et ne commet plus d'erreurs. Il est efficace et son expérience rend sa productivité optimale. C'est celui qui détient le savoir, mais souvent il est incapable de le verbaliser ou même d'en avoir conscience.

Le formateur (ou *trainer*) est un expert dont l'activité se consacre partiellement ou totalement à la formation des employés. Non seulement il possède l'expertise acquise sur le terrain, et la capacité de verbaliser son expertise, mais il accède de surcroît à un niveau supérieur de réflexivité, grâce à des connaissances supplémentaires, par exemple sur le normatif.

Le développeur (ou *game programmer*) intervient peu dans la phase de conception, mais il assure par la suite la mise en œuvre de toutes les tâches suivantes. Il travaille rarement seul mais en équipe, car sa tâche représente une part très importante dans le budget du projet. Il maîtrise la programmation des moteurs de jeux et assure l'intégration des données pédagogiques du scénario et des *assets* graphiques dans un environnement virtuel interactif.

Le graphiste 3D (ou *3D modeler*) est un rôle complémentaire à celui du développeur qui consiste en la production de toutes les ressources graphiques (appelées *assets*) qui constituent le jeu : l'environnement, les objets et leurs textures, les personnages et leurs animations, ainsi que les éléments d'interface comme les menus.

2.1.2 Problématique de la conception collaborative

Le processus de conception est donc par nature collaboratif, et une méthodologie appropriée simplifie le dialogue entre les experts du domaine et les experts pédagogiques. Par exemple, [Deng et al.(2014)] proposent une méthodologie de conception utilisant des cartes pour symboliser les concepts, rendre tangible l'élaboration des idées, et faciliter la collaboration. Ce concept a été utilisé dans [Loup(2017)] pour faciliter la conception de scénarios pédagogiques et éprouver leur pertinence préalablement à la mise en chantier du développement. Dans une approche différente du dialogue, [De Troyer et al.(2017)] propose un langage de modélisation spécifique au domaine proche du langage naturel appelé *ATTAC-L*.

Faciliter le dialogue entre les acteurs est une première étape. La seconde consiste à proposer des modèles compréhensibles par tous.

2.2 Représentation des connaissances

Le recueil des connaissances permet l'extraction de savoirs qui sont souvent de formes très hétérogènes : connaissances théoriques, compétences métiers, bonnes pratiques, expertise, etc. Plusieurs modèles existent pour la représentation de ces données.

2.2.1 Ontologie d'un domaine

Une ontologie est un modèle de la connaissance consensuel et partagé, abondamment utilisé pour son potentiel d'expressivité et d'explicabilité dans les EIAH [Desmoulin & Grandbastien(2006)] qui constituent par ailleurs un autre champ très pluridisciplinaire. Une ontologie se compose des éléments suivants [Psyché et al.(2003)] : les concepts sont des abstractions des éléments utiles à la formation, des primitives de représentation de la connaissance ; les relations entre les concepts sont d'ordre sémantique et traduisent la structuration du domaine étudié ; les fonctions sont des relations particulières ; les axiomes établissent la signification des concepts ; et enfin les instances sont des individus particuliers d'un concept. L'ontologie est plus ou moins formalisée, rédigée en langage naturel ou selon un langage formel se prêtant à des représentations graphiques. On trouve des



ATEUR

[illegible]

approche s'effectue traditionnellement par l'observation de l'agent en situation de travail, soit directe soit par le biais d'enregistrements vidéo éventuellement annotés a posteriori par l'agent lui-même, un expert ou un formateur. L'entreprise semble plutôt facile mais deux remarques doivent être intégrées. D'une part, plusieurs exécutions de la tâche sont possibles : nominale, telle qu'elle est prescrite par le manuel et les bonnes pratiques, ou optimale, telle qu'elle est pratiquée par les experts qui ont aménagé avec l'expérience des adaptations de la prescription pour s'adapter à la réalité du terrain. D'autre part, les occasions d'erreurs, qui jalonnent la tâche, devront être ajoutées par la suite, ce qui pose le problème de leur identification, et par ailleurs de leur intégration dans la représentation numérique de l'activité.

Plusieurs méthodologies s'intéressent à la description de l'activité humaine. *Cognitive Task Analysis* [Crandall et al.(2006)] (CTA) désigne «une famille de méthodes pour l'étude et la description du raisonnement et des connaissances, utilisées par les formateurs et les concepteurs pédagogiques pour identifier quels processus la formation doit mettre en œuvre, et de quelle façon pour être la plus efficace». *Hierarchical Task Analysis* [Annett & Duncan(1967)] (HTA) est une autre méthode ayant pour objectif d'extraire la connaissance de l'expert pour mieux concevoir la formation de l'apprenant. HTA propose une décomposition récursive d'une tâche en sous-tâches. *Critical Cue Inventory* [Grassi(2000)] (CCI) est une méthodologie basée sur l'identification des signaux critiques, c'est à dire les éléments visuels ou sonores qui remplissent un rôle lors de l'exécution de la tâche. L'intérêt de cette méthodologie réside en sa capacité à s'assurer de la fidélité de l'environnement de formation qui sera produit par la suite. Enfin, [Camus(2010)] utilise une méthode originale de résolution collaborative des conflits appelée PAT (pour Peur, Attraits et Tentations) [Le Cardinal(1992)] pour la modélisation des acteurs de l'environnement de formation. Son ambition est une meilleure prise en compte des facteurs humains pour mener les apprenants à comprendre volontairement les motifs de la règle et les conséquences de son éventuelle violation. Il existe encore d'autres méthodes dont un panorama plus complet est proposé dans [Couix & Burkhardt(2011)].

Le recueil des données concernant l'activité fait ensuite l'objet d'une représentation numérique. Celle-ci est d'autant plus importante que, à l'instar des ontologies de la section précédente, cette représentation nourrit plusieurs objectifs : en phase de conception, corrections et relectures par divers acteurs du processus ; puis en phase de formation, traitements automatisés pour guider ou évaluer l'apprenant, ou pour le contrôle réaliste des personnages virtuels qui côtoient l'apprenant (plus de détail à ce sujet dans le chapitre 5). Les formalismes utilisés s'inspirent de disciplines diverses.

Business Process Modelling Notation (BPMN) est particulièrement adapté à la représentation des processus d'activité. Le modèle BPMN d'une activité simplifiée de 3D-VOR est illustré dans la figure 2.2. On y voit différentes pistes correspondantes aux rôles impliqués dans la séquence, ainsi que les actions et les événements structurés grâce à différents éléments de syntaxe : séquence de flux, tâches parallèles ou exclusives, etc. ACTIVITY-DL [Barot et al.(2013)] est un formalisme développé sur mesure pour la description de l'activité dans l'architecture originale HUMANS. Sa syntaxe repose sur les relations de l'algèbre des intervalles de Allen. Les connaissances modélisées sont ainsi parfaitement intelligibles pour un algorithme, et la visualisation graphique est fournie par un outil tiers.

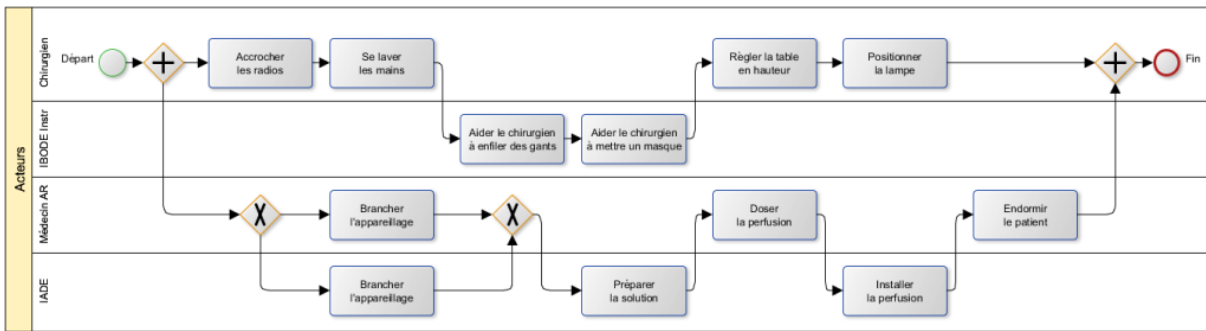


FIGURE 2.2 – Utilisation du format BPMN pour la représentation d'une séquence d'activité collaborative (exemple illustratif simplifié). Les différentes pistes permettent la séparation des rôles. Des éléments de syntaxe représentent les alternatives ou les actions qui doivent être menée en parallèle.

La Méthode Analytique de Description (MAD*) de [Scapin & Bastien(2001)] est une méthode de description de la tâche originalement destinée à la conception d'interfaces mais son formalisme (tâches, états initial et final, préconditions, post-conditions, etc.) et sa syntaxe (tâches séquentielles, parallèles, alternatives) la rendent tout à fait compatible avec la conception d'un outil de formation. Dans le même registre, on peut aussi citer *Groupware Task Analysis* (GTA) [Van Der Veer et al.(1996)] qui introduit la dimension collaborative d'une tâche.

La modélisation chronologique, bien qu'elle soit naïvement la plus intuitive, n'est pas la seule manière de représenter une activité. Par exemple, la figure 2.3 illustre une représentation hiérarchique «arborescente» des éléments d'un scénario d'une formation immersive à l'aide d'une carte mentale.

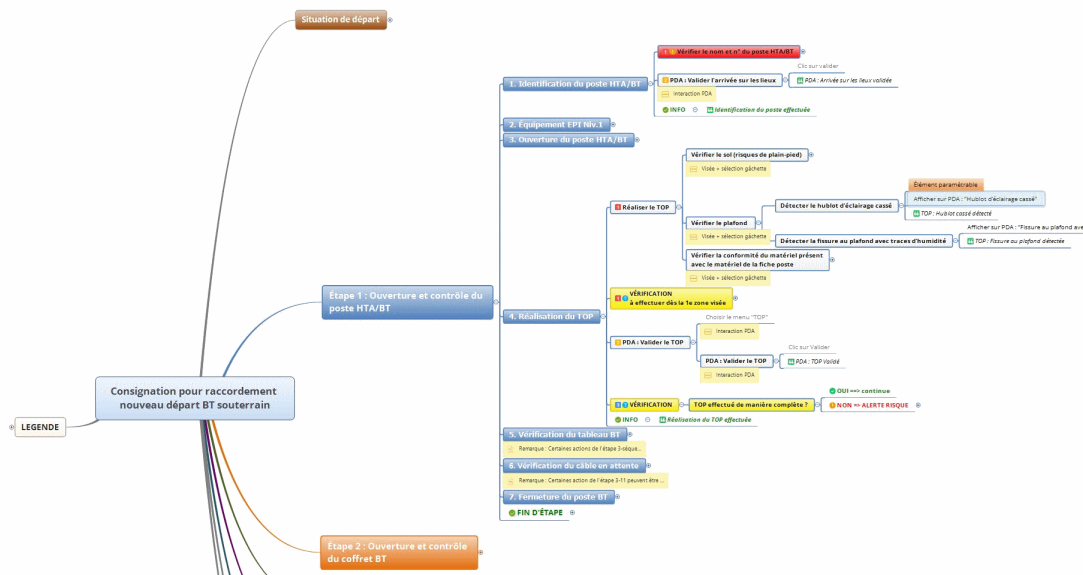


FIGURE 2.3 – Modélisation d'un scénario pédagogique par le studio Numix : une carte mentale décompose récursivement une activité en une série d'objectifs à réaliser.

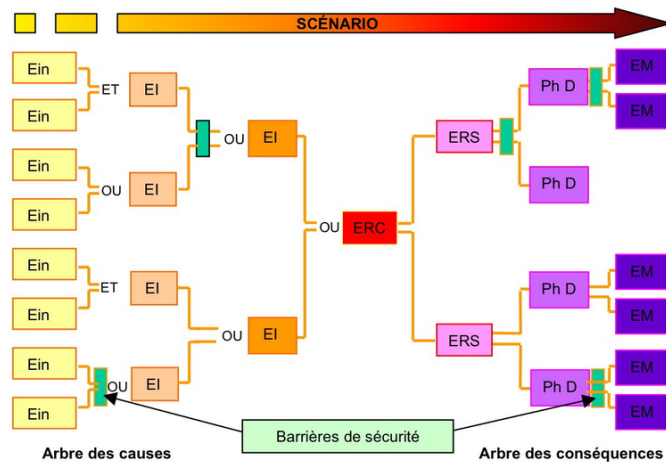


FIGURE 2.4 – Illustration d'un diagramme en nœud papillon tirée de [Martinais(2011)].

2.2.3 Modélisation du risque

Lorsque la formation intègre une composante liée à la gestion des risques, ce qui est très courant dans les formations aux métiers techniques, une alternative à la description de l'activité consiste à centrer l'analyse sur les risques potentiels qui menacent le bon déroulé de cette activité. Pour [Hollnagel(2017)], la tâche n'est jamais suffisamment simple pour être explicitée de manière exhaustive et suivie de manière mécanique. Les conditions d'exécution sont toujours inconnues à l'avance, et les différences entre tâche prescrite et tâche effectuée sont donc inéluctables. Son modèle FRAM propose de s'appuyer sur l'analyse des risques potentiels, de leurs conséquences, et éventuellement des moyens de récupération. Les graphes (voir figure 2.4) constituent un support pertinent pour la représentation des risques. Le modèle en «nœud papillon» est une représentation classique du risque en HSE qui permet de mettre en lumière les facteurs causaux, les possibles développements, mais aussi les barrières de prévention et/ou de mitigation. L'élément au centre est appelé l'événement redouté central (ERC), c'est à dire une rupture, brèche, perte d'intégrité physique, etc. La partie gauche (chronologiquement antérieure) représente les causes sous la forme d'un arbre des causes⁹ : l'ERC est provoqué par un événement initiateur (EI), parmi plusieurs possibles, lui-même conséquences d'éléments indésirables (EIn) qui sont des dérives ou des défaillances. La partie droite correspond à un arbre d'événements [Zwinglestein(1995)] ; il décrit les développements possibles de l'ERC en phénomènes dangereux (Ph D) puis en effets majeurs (EM). Dans chacun de ces deux arbres sont représentées les barrières ou les mesures qui permettent de prévenir l'apparition des EI ou de limiter les conséquences des Ph D. Dans le projet V3S, dont l'objectif central est la formation aux risques, [Camus(2010)] introduit le modèle de risques MELISSA, dans lequel chaque risque potentiel est analysé préalablement et représenté par un graphe papillon, associé à un modèle probabiliste d'occurrence. En particulier chaque barrière humaine constitue un élément d'intérêt pédagogique devant idéalement figurer dans la scénarisation.

9. L'analyse de l'accident au travail : la méthode de l'arbre des causes. Rapport de l'Institut National de Recherche et Sécurité (INRS). 2013

2.2.4 Modélisation des processus décisionnels

Enfin, une autre approche pertinente dans les formations immersives consiste à modéliser le système du point de vue des décisions prises par les acteurs dans un contexte de situation dynamique. [Cardin(2016)] propose un état de l'art détaillé des nombreux modèles cognitifs qui visent à comprendre de quelle manière sont prises les décisions individuelles ou collectives, et leur intégration comme éléments de scénarisation pédagogique d'un environnement d'apprentissage.

Le recueil des données nécessaires à la modélisation d'une formation immersive fait souvent apparaître plusieurs dimensions ou angles dans la description des tâches. Souvent, ce sont des modèles hybrides qui résultent de cette phase de conception. Par exemple, la méthodologie incrémentale mise en œuvre dans [Camus(2010)] consiste en l'analyse des risques, puis de l'activité puis enfin des facteurs humains. Trois modèles en résultent, qui constituent la base de la scénarisation à l'étape suivante : analyse des barrières (ADB), analyse de la tâche prescrite (ATP) et analyse des facteurs d'influence (AFI).

2.3 Scénarisation pédagogique

Faisant suite à la phase de recueil des connaissances, ou parfois menée en parallèle, la phase de scénarisation représente une bascule entre l'observation de l'existant et la mise en œuvre de l'objectif de formation. Scénariser, c'est présenter les informations sous la forme d'un récit, car c'est sous cette forme que l'Homme depuis toujours communique son expérience à autrui, et l'assimile d'autrui. La scénarisation repose ainsi sur un principe d'immersion «fictionnelle», qui se superpose dans les jeux immersifs à l'immersion virtuelle.

Selon [Barot et al.(2013)], à propos de la formation aux métiers techniques à risque, l'apprentissage proposé doit être tourné vers les objectifs suivants : i) adopter un comportement adéquat dans les situations anormales, ii) améliorer la compréhension du processus, iii) acquérir de nouvelles compétences et connaissances tout en maintenant grâce à l'exercice celles déjà acquises, et iv) transmettre les procédures et les règles de bonne pratique. Dans la poursuite de ces objectifs, le cadre fourni par l'environnement virtuel offre plusieurs avantages : mise en situation, même lorsque la situation réelle ne le permet pas ; simplification ou segmentation de l'apprentissage ; exploration des conséquences de ses erreurs, et enfin ; familiarisation avec les paramètres de la situation permettant de prendre conscience de leur rôle et d'apprendre à les maîtriser [Burkhardt et al.(2005)]. En outre, un autre défi de la scénarisation consiste à mettre en œuvre une progression pédagogique qui doit favoriser une montée en compétences graduelle de l'apprenant.

2.3.1 Scénarisation et narration dynamique

Le *storyboard* est un document très largement utilisé dans la conception des jeux vidéos. Tiré du cinéma, il décrit l'enchaînement des plans du scénario. Utile grâce à sa présentation visuelle chronologique compréhensible de tous, il est peu adapté à la prise

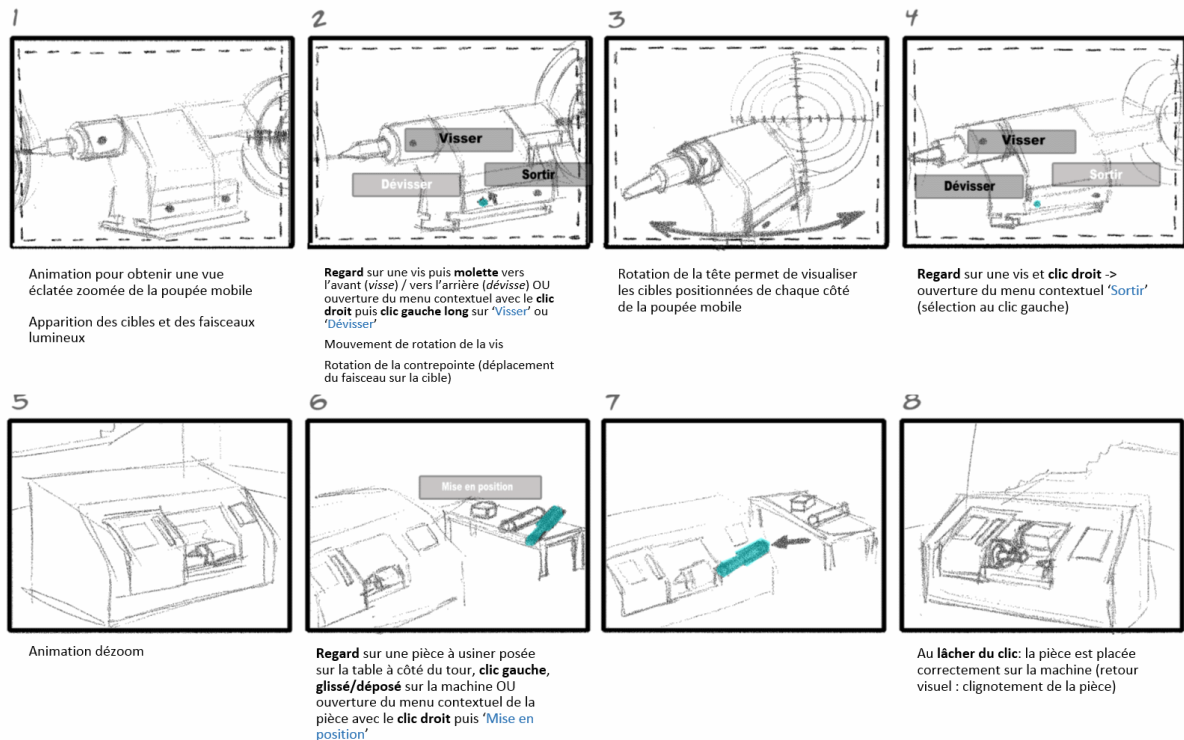


FIGURE 2.5 – Exemple de storyboard décrivant une activité pédagogique de génie mécanique dans le projet Mecateam3D.

en compte des considérations pédagogiques, et se prête mal à une projection numérique exploitable. Le langage IMS-LD [Koper et al.(2003)] est un langage de description de l'activité pédagogique qui a l'avantage d'être opérationnalisable car décrit en XML. Ces outils se destinent cependant à la description linéaire et s'adaptent mal aux scénarios interactifs qui évoluent dynamiquement.

La scénarisation interactive, en revanche, constitue un des grands défis de la conception des jeux d'apprentissage immersifs. Dans une logique d'apprentissage expérientiel, il s'agit de concilier une exploration libre du scénario¹⁰ tout en cadrant les actions du joueur : on retrouve le classique compromis entre contrôle et liberté. Plus de contrôle facilite la scénarisation, garantit un apprentissage progressif et maîtrisé qui se concentre sur le contenu pédagogique. En revanche, le contrôle bride la liberté du joueur de vivre des expériences authentiques, impacte négativement son engagement et donc peut rendre l'apprentissage trop schématisé (i.e. peu transposable *in fine*). Plus de liberté requiert une grande adaptativité du scénario ou du jeu. Les expériences vécues sont authentiques et signifiantes. Mais du point de vue technique, c'est souvent très contraignant et parfois impossible à réaliser du fait de la combinatoire des actions possibles. C'est le défi de la narration dynamique.

10. Le terme scénario est assez polysème : il désigne le déroulement d'une activité pédagogique, mais caractérise aussi bien la description préalable qu'en a faite le concepteur pédagogique que le déroulement effectif tel qu'il est vécu par les apprenants

Un état de l'art riche sur les différentes techniques de scénarisation dynamique des environnements virtuels pourra être trouvé dans [Barot(2014)]. En règle générale, un scénario pédagogique permet à l'apprenant l'exploration réaliste et interactive d'une situation de travail usuelle mais toutefois «jalonnée» d'anomalies ou d'événements indésirables qui constituent un intérêt pédagogique en ce qu'ils permettent de mettre en lumière les compétences d'anticipation, de décision et de réaction de l'apprenant. Les objectifs pédagogiques associés à ce scénario concerneront aussi bien la maîtrise de la procédure nominale (tâche prescrite) que les compétences de prévention et/ou de mitigation d'une dégradation des conditions de l'activité.

L'évolution dynamique du scénario pédagogique impose donc deux contraintes. La première se traduit par le besoin de formalismes de description du scénario offrant la richesse d'expressivité nécessaire pour prendre en considération les multiples voies que peut emprunter l'exploration libre d'une activité (voir notamment [Marion(2010), Barot(2014)]). La deuxième est la nécessité d'enrichir les environnements d'apprentissage de moteurs (associés à ces représentations) capables de mettre en œuvre le déroulement de manière dynamique en maintenant le contrôle de l'activité malgré la liberté d'exploration. De tels moteurs utilisent généralement des techniques classiques de l'intelligence artificielle comme les moteurs d'inférence (DIRECTOR [Barot(2014)]) ou encore les réseaux de Petri (#SEVEN [Claude(2016), Delmas et al.(2007)]). Parfois, le scénario n'évolue pas uniquement au gré des activités de l'apprenant mais plutôt à travers ses interactions sociales avec les autres joueurs ou des personnages non joueurs. Cette forme de scénarisation, qu'on retrouve alors sous le terme d'*interactive drama*, est mentionné dans la section 5.3.

2.3.2 Scénariser en accord avec les objectifs pédagogiques

Outre le succès de la scénarisation, la vérification de l'adéquation entre les activités proposées et les objectifs est une étape décisive. [Lourdeaux(2001)] a montré que la restitution naïve de la tâche observée dans le réel sous forme d'activité dans l'EV ne garantit pas l'atteinte des objectifs pédagogiques, indépendamment de la qualité de la restitution. L'élaboration d'activités pédagogiques pertinentes est sous-tendue par la capacité du concepteur à comprendre les niveaux fonctionnel et cognitif de la tâche et à en construire un modèle conceptuel.

Certaines méthodologies de conception intègrent explicitement une étape de valida-

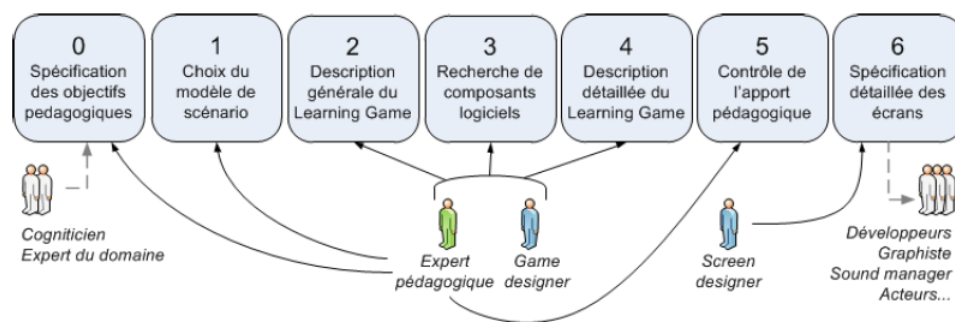


FIGURE 2.6 – Les 7 étapes de granularisation d'un scénario pédagogique.

tion. C'est le cas par exemple dans la méthodologie de conception par granularisation progressive de [Marfisi-Schottman et al.(2010)], où l'étape 5 (sur 7 étapes, illustrées dans la figure 2.6)) consiste à valider les apports pédagogiques des scénarios, avant l'implémentation du projet. Ce cadre se limite toutefois à des scénarios «missions» où les joueurs enchaînent les étapes dans un ordre pré-établi.

En règle générale, l'utilisation d'une méthodologie doit permettre d'établir non seulement des objectifs pédagogiques, mais aussi par la même occasion les métriques d'évaluation qui y sont associées [Galaup(2020)]. C'est l'argument défendu par [Mislevy et al.(2003)] dans une méthodologie appelée *Evidence Centred Design* (ECD), dans laquelle le lien entre activité et compétence est non seulement rendu explicite, mais également placé au cœur du processus de conception de l'environnement d'apprentissage. Les compétences à évaluer (non observables) sont externalisées par des comportements (observables), articulés par des tâches ou des situations qui portent l'aptitude de provoquer ces comportements, et donc de les observer. En explicitant le lien entre activité et compétence, cette méthodologie a pour ambition de faciliter l'interprétation des données collectées auprès des joueurs : Lors de l'évaluation de leur performance, le succès ou l'échec de la réalisation des tâches sont rétro-propagés et fournissent autant de preuves de l'acquisition (ou respectivement de la carence) des compétences associées. La figure 2.7 illustre le fonctionnement de l'approche ECD. Le modèle de preuve (*evidence model*) au cœur du dispositif est implémenté par un réseau bayésien pour modéliser les relations statistiques entre compétences et indicateurs observés. Cette méthodologie a été appliquée avec succès dans les EIAH [El-Kechai et al.(2015)]

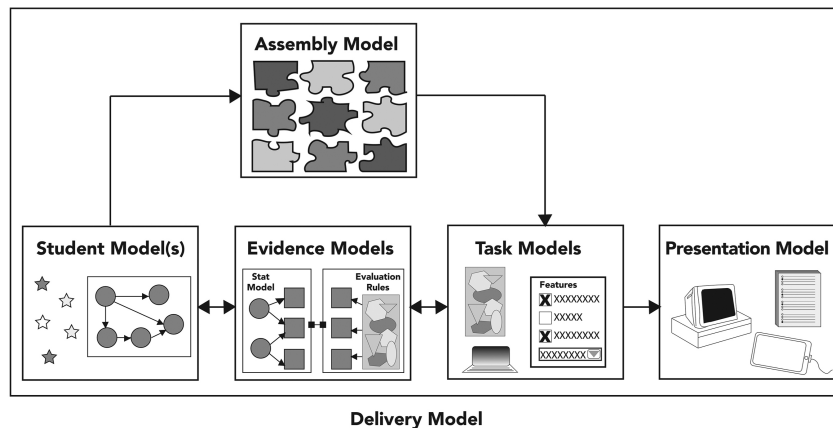


FIGURE 2.7 – La méthodologie de conception centrée sur la preuve repose sur une approche ascendante où les activités faisant office de preuves de maîtrise des savoirs sont autant de briques permettant l'assemblage de scénarios.

Pour terminer sur cette section consacrée à la conception des scénarios, relevons qu'il s'agit généralement d'une tâche complexe et fastidieuse, notamment dans le contexte de formations techniques ou à risques, dans lesquelles des scénarios trop simplistes ne permettraient pas de rendre compte des arbitrages constants entre production et maîtrise des risques [Camus(2010)]. L'assistance à la scénarisation constitue donc un moyen efficace de soulager le travail du concepteur.

2.3.3 Assistance à la scénarisation : *authoring* et PCG

On distinguera les outils auteurs, qui visent à déléguer la production des scénarios aux experts, de la génération procédurale, qui ambitionne l'automatisation partielle de cette tâche.

Outils auteurs Il s'agit d'outils développés spécifiquement pour un projet, ou pour une gamme de projets et visant à faciliter le travail de l'auteur. L'assistance proposée n'a pas ambition de se substituer à l'expérience ou au travail de réflexion pédagogique, mais plutôt d'impliquer l'expert du domaine dans le processus de conception de scénarios. Généralement présentés sous la forme d'environnements graphiques, les outils auteurs offrent la possibilité à des publics peu familiers de l'ingénierie des connaissances de concevoir en (semi)-autonomie : de la personnalisation de scénarios stéréotypés [Marne & Labat(2014), Vermeulen et al.(2016)] à la construction d'une activité par assemblage de composants [Marfisi-Schottman et al.(2010)]. D'autres travaux proposent une approche plus originale offrant la possibilité à l'expert d'enregistrer l'activité directement dans l'environnement virtuel. Dans [Lécuyer et al.(2020)], l'activité d'un expert immergé dans un environnement interactif est enregistrée action par action, et transcrite sous la forme d'un scénario qui pourra ensuite être rejoué dans différentes configurations. Tout objet participant à l'activité doit cependant être préalablement décrit dans l'environnement, avec ses capacités d'interactions. [Duval(2017)] propose une approche similaire permettant la numérisation automatique de scénarios par un expert à la manière de l'enregistrement d'une macro Excel. Ce travail est détaillé dans mes contributions dans la section 2.4.

Génération procédurale de contenu Une autre forme d'assistance qui allège considérablement le travail des auteurs ou des concepteurs consiste à laisser des algorithmes générer du contenu pédagogique de manière automatique. Un intérêt immédiat de la génération procédurale est l'allègement du travail de modélisation de l'environnement ou des données scénaristiques du jeu. Cette approche permet également une meilleure rejouabilité (*replay-value*) en faisant varier l'environnement et les scénarios d'une session de jeu à l'autre. Enfin, elle facilite l'adaptation du contenu au joueur en intégrant des paramètres liés à son profil et/ou à son expérience comme contraintes lors de la génération de parcours adaptatifs. Il est courant de voir la narration d'un jeu de type *e-learning* assistée par un algorithme comme dans Mecagenius [Galaup et al.(2015)] ou bien [Callies(2016)] qui fournit à un réseau bayésien les *feedback* des activités. Toutefois, la génération automatisée du scénario d'un jeu immersif d'apprentissage se heurte encore beaucoup à la complexité des différents chemins envisageable, ainsi qu'à la problématique du contrôle de sa validité. L'approche *interactive storytelling* (décrite au chapitre 5) représente l'avancée la plus remarquable en la matière. La création automatisé des environnements 3D dans lesquels se situent les expériences interactives constitue également un domaine d'application intéressant (voir 3.1).

2.4 Contributions

Mes contributions à l'état de l'art en ce qui concerne la numérisation et la gestion des connaissances pour les jeux sérieux immersifs sont détaillées dans les paragraphes suivants.

Les niveaux d'interaction dans Roma Nova

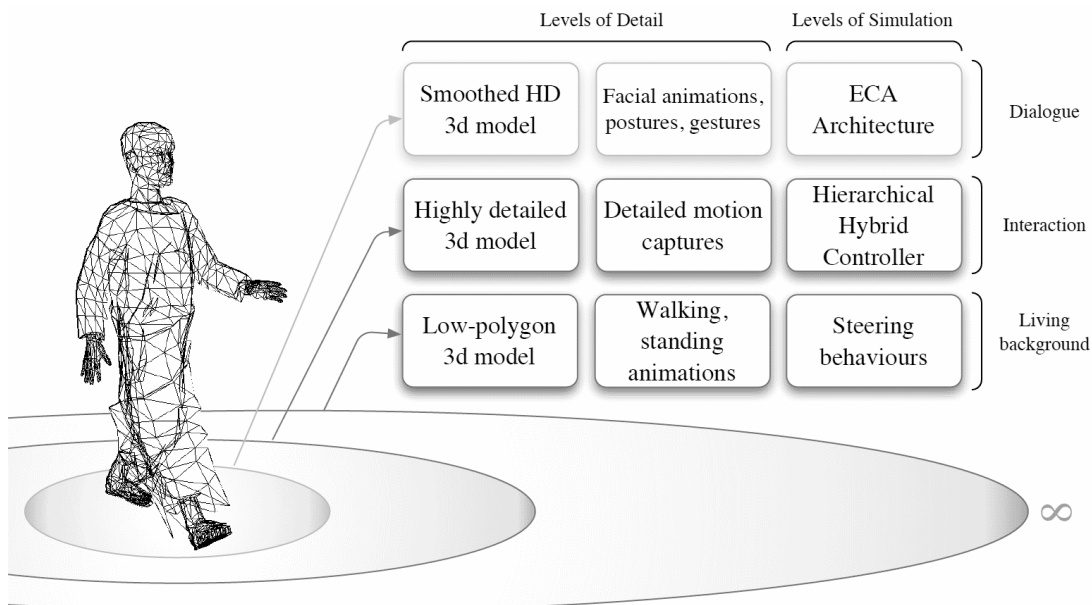


FIGURE 2.8 – Le principe des niveaux d'interactions est très largement inspiré des techniques de l'informatique graphique connues sous les noms des niveaux de détails (Levels of Detail, LoD) et des niveaux de simulation Levels of Simulation, LoS) qui visent à adapter le niveau de détail des objets 3D et le temps alloué à leur animation en fonction de la distance de ces objets relativement au point de vue du joueur.

Dans le projet Roma Nova, que j'ai coordonné durant mon séjour au Serious Games Institute de l'Université de Coventry (Royaume-Uni), j'ai développé, en collaboration avec des collègues de Coventry et de l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse, un cadre conceptuel permettant de guider la scénarisation d'un apprentissage immersif dans un environnement 3D au moyen unique d'une foule de romains virtuels. Ce cadre conceptuel identifie trois «niveaux d'interaction» en fonction de la proximité entre le joueur et le personnage non-joueur (conversation, entourage proche, foule distante), chacun proposant une gamme d'interactions pertinentes. Tel qu'illustré dans la figure 2.8, dans chaque niveau sont recensées les techniques d'affichage, d'animation et de simulation comportementale qui permettent de mettre en œuvre efficacement les interactions proposées à chaque niveau, tout en permettant de faire vivre à l'écran une foule dense. Ce travail a donné lieu à plusieurs publications internationales. [Panzoli et al.(2010b), Panzoli et al.(2010c)]

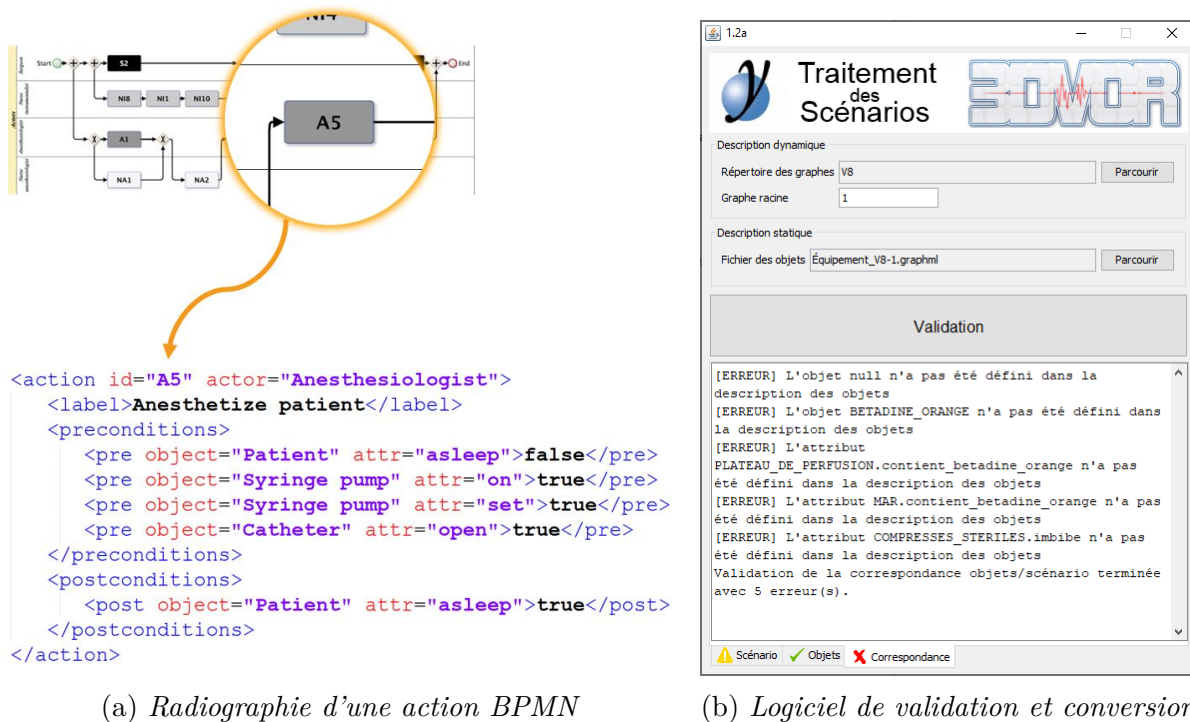


FIGURE 2.9 – Chaque action dans le diagramme BPMN d'un scénario est décrite par un ensemble de préconditions et de post-conditions (a) qui sont analysées et validées par un outil développé spécifiquement (b) avant d'être traduites en XML puis intégrées au moteur de jeu.

Numérisation et validation automatique de scénarios

Dans le projet 3D Virtual Operating Room (3D-VOR) dans lequel j'ai assuré un rôle de coordinateur scientifique, j'ai proposé un formalisme de représentation du contenu répondant aux objectifs suivants :

- Les scénarios doivent être décrits par un ingénieur en gestion des connaissances (assisté d'experts du domaine) à l'aide d'un logiciel d'édition graphique,
- La description du contenu doit intégrer à la fois les aspects dynamiques de l'activité (i.e. les séquences d'action pour chaque rôle dans le scénario, la collaboration, etc.) et les aspects statiques (i.e. les objets de l'environnement et leurs états possibles),
- La représentation numérisée du contenu doit pouvoir être exploitée par un algorithme d'intelligence artificielle pour la simulation automatisée de chaque personnage du jeu (voir les contributions du chapitre 5, page 75).

Le modèle que j'ai proposé, et qui s'inspire de travaux pré-existants dans le domaine, considère l'activité comme une série ¹¹ discrète d'actions, dans laquelle chacune est caractérisée par un ensemble de changements d'états des objets de l'environnement. La figure 2.9a illustre la représentation interne dans un formalisme XML d'une action du diagramme

11. Le terme série est usurpé car dans la pratique, la grammaire de notation BPMN autorise bien plus que l'enchaînement séquentiel des actions : des pistes pour représenter la collaboration, des chemins alternatifs, des choix, des événements, etc.

BPMN d’une activité (les libellés des actions ont été remplacés par des identifiants) par un ensemble de préconditions (qui rendent l’action possible) et de post-conditions (qui déterminent les changements d’états). Tout au long du projet 3D-VOR, les scénarios ont été élaborés graphiquement sous forme de BPMN dans un outil appelé Yed, par l’ingénieur en charge de la gestion des connaissances assisté d’experts du milieu hospitalier (chirurgiens, anesthésistes, etc). Outre les aspects liés à la modélisation, j’ai développé un outil (illustré dans la figure 2.9b) permettant la conversion automatisée d’un scénario représenté par un ensemble de graphes BPMN (au format GraphML, ouvert et lisible en clair) en données XML exploitables par le moteur de jeu développé par le partenaire industriel et par le moteur d’intelligence artificielle. Durant la conversion des données graphiques en données XML, l’outil permet une validation à deux niveaux :

- Validation des séquences de flux : vérifier que les préconditions et les changements d’états dans les actions ne mènent pas à des blocages ou des actions impossibles à réaliser.
- Validation des états : vérifier que les états manipulés dans chaque action sont cohérents avec la description statique de l’environnement.

À l’issue de la validation, l’outil produit plusieurs résultats :

- Un rapport détaillé permettant de prendre connaissance des erreurs des scénarios (action irréalisable, état non connu d’un objet, etc), et le cas échéant les corriger. En l’absence d’erreur,
- Du contenu XML représentant les actions du jeu et chargés de manière automatique par le moteur de jeu, et
- Une ébauche de l’environnement sémantique, recensant tous les objets qui apparaissent dans l’activité, avec leurs états respectifs.

Les contributions plus spécifiques relatives à l’environnement sémantique sont présentées dans la section 3.4, et celles liées au moteur d’intelligence artificielle pour le contrôle des PNJ dans la section 5.5. Ce formalisme est décrit de manière détaillée dans un chapitre d’ouvrage de synthèse [Panzoli et al.(2017)].

Enregistrement de l’activité inspiré par les “macros”

Durant son doctorat, Yohan Duval a travaillé à l’élaboration d’un outil auteur permettant de décrire des séquences pédagogiques mixtes, se déroulant pour partie dans un environnement virtuel simulé (un véhicule interactif en 3D) et dans les menus d’un logiciel existant de diagnostic automobile [Duval(2017)]. Au cours de mon encadrement de ce travail de thèse, j’ai participé à la proposition d’une méthodologie de capture d’un scénario pédagogique inspiré par l’enregistrement d’une “macro”, telle qu’elle est proposée dans certains outils des suites bureautiques comme Microsoft Excel par exemple. En pratique, les actions de l’expert sont capturées directement dans le véritable outil de diagnostic (progression dans les menus) ou l’environnement virtuel (interactions avec le véhicule) et enregistrées sous formes de graphes, en empruntant une grammaire similaire à celle de BPMN (séquences de flux, opérateurs pour l’exclusion ou la parallélisation). Les graphes ainsi construits par affinages successifs sont ensuite éditables graphiquement pour permettre l’intégration par le formateur du contenu pédagogique au contenu métier. La figure 2.10 présente un cas de scénario simpliste. Le graphe rouge et les graphes violets

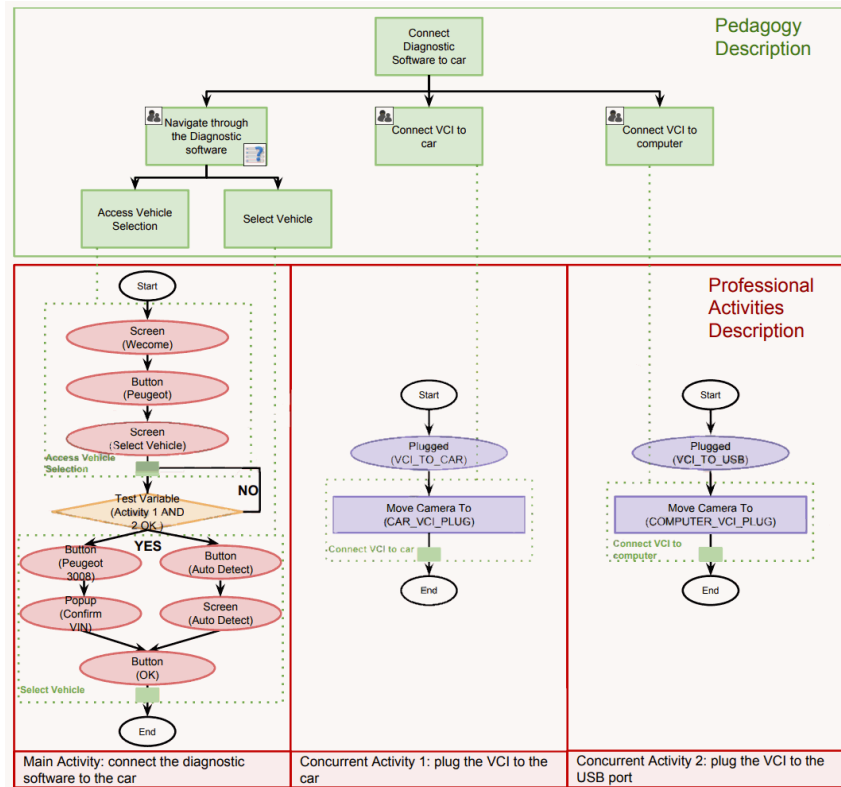


FIGURE 2.10 – Le graphe représentant un scénario de Diag’Adventures laisse apparaître la couche métier enregistrée par l’expert et la « sur-couche pédagogique ».

représentent des séquences d’actions capturées et traduites sous forme de diagrammes d’activités BPMN. La couche pédagogique, appliquée manuellement *a posteriori*, consiste en un arbre d’objectifs dont les feuilles sont liées à la réalisation de certaines actions dans les graphes métier. Les résultats publiés dans [Duval et al.(2015)] et [Duval et al.(2016)] mettent en évidence l’accessibilité et le gain de productivité associés à un tel outil auteur, pour la numérisation des données de jeu par un public non-expert.

2.5 Bilan du chapitre

La méthodologie traditionnelle de conception d’un jeu d’apprentissage immersif, et particulièrement lorsqu’il s’agit d’un métier technique, débute par une phase de collecte des informations relatives aux tâches qui constituent le ou les objectifs pédagogiques. L’enjeu de la modélisation de la tâche est clair : être capable par la suite, et à chaque instant, d’évaluer l’activité de l’apprenant et de lui fournir un accompagnement pertinent, en limitant tant que possible le risque de mal interpréter ses intentions. Or, chaque tâche dissimule une complexité que la description seule ne peut suffire à révéler. En effet, l’enchaînement d’actions ou d’interactions par un ou plusieurs acteurs ne dévoile rien des motivations qui animent leurs actions, des décisions qui motivent leurs gestes ou des observations qui précèdent leurs décisions, des risques qu’ils encourent ou qu’ils maîtrisent, des marges d’exécution, etc. Pour cette raison, la modélisation du scénario d’une situation d’apprentissage requiert l’emploi de nombreuses méthodologies, chacune s’attachant à décrire un aspect particulier, et chacune produisant un corpus de connaissances dans

un formalisme lui étant propre. La multiplicité et l'hétérogénéité des sources de données, et la quête d'exhaustivité dans la compréhension de l'activité métier, expliquent en partie la grande complexité de la tâche de numérisation et de scénarisation. Or, le principe de l'apprentissage expérientiel, dans sa logique la plus nue, n'inclut pas la nécessité d'un accompagnement ou d'un débriefing de l'activité (qui sont des notions introduites par les pédagogues). Au contraire, l'idée sous-jacente de l'apprentissage expérientiel est de laisser l'apprenant créer ses propres représentations et ses propres schémas mentaux en multipliant les expériences pratiques au contact de l'environnement, plus exactement par pression des rétroactions constantes de ce dernier. Notre projet de recherche, notamment à partir de la section 7.2, introduit l'idée d'une activité d'apprentissage reposant non pas sur une modélisation pédagogique experte et omnisciente, mais plutôt sur la conception et la mise à disposition d'un environnement extrêmement fidèle et exhaustif dans la restitution de ses dynamiques, obtenu idéalement en limitant l'intervention humaine au profit d'une automatisation apte à s'affranchir de tout artefact que l'humain pourrait introduire dans le processus d'apprentissage.

3 | Modélisation d'un environnement virtuel de formation

Scénariser les interactions pédagogiques

L'élaboration de l'environnement virtuel 3D (EV3D) est la première étape de la transformation d'un plan de formation, jusqu'à présent constitué de modèles et de scénarios, en un outil propre à l'immersion des apprenants, et dans lequel le plan pourra être mis à exécution. L'environnement peut prendre des formes très différentes, restituer de manière très réaliste le contexte réel ou au contraire proposer une expérience imaginaire, mettre en œuvre le scénario de manière austère et sérieuse, ou au contraire encourager ou amuser l'utilisateur. Pour le concepteur, indépendamment des choix de représentation, l'environnement est surtout un ensemble d'états, de paramètres, de règles qui garantissent le bon déroulement de l'expérience, dans les conditions qui ont été prévues.

Sommaire du chapitre

3.1	Propriétés d'un EV3D	41
3.1.1	Dynamisme et interactivité	42
3.1.2	Intégration utilisateur et collaboration	43
3.1.3	Réalisme versus <i>fun</i>	44
3.1.4	Notion d'environnement «informé»	45
3.2	Modélisation sémantique de l'environnement	46
3.3	Environnement formateur	47
3.4	Contributions	48
3.5	Bilan du chapitre	50

3.1 Propriétés d'un EV3D

Dans le contexte que nous développons dans ce mémoire, à savoir celui des jeux d'apprentissage immersifs, l'environnement virtuel désigne une représentation computationnelle et graphique où le contenu pédagogique – tel que nous l'avons défini dans le chapitre précédent – est présenté de manière située aux apprenants, pour que ces derniers soient en mesure de simuler une activité d'apprentissage scénarisée. L'environnement virtuel représente en d'autres termes l'espace effectif des interactions pédagogiques, et de ce fait il

est caractérisé par un certain nombre de propriétés, certaines indispensables et d'autres résultant d'un choix, toutes ayant des implications sur la manière dont les interactions seront mises en œuvre dans le chapitre suivant.

L'environnement est modélisé numériquement, et cette tâche incombe principalement aux graphistes 2D, modelers et animateurs 3D, le travail de programmation qui incombeait jadis aux développeurs étant de nos jours largement pris en charge par les moteurs de jeu : Unity3D, Unreal Engine, Godot, Phaser.io pour ne citer que les plus connus. Le plus gros du travail consiste donc à fabriquer (ou acquérir) des modèles numériques des environnements, des objets et des acteurs qui constitueront le décor et les acteurs du scénario d'apprentissage. Dans un projet de jeu sérieux immersif, il s'agit généralement du poste de dépense le plus important car ces tâches sont à la fois fastidieuses et confiées à des opérateurs très qualifiés. Depuis plusieurs décennies, la génération procédurale n'a cessé de chercher à alléger cette tâche en proposant des algorithmes capables de produire de manière automatique des environnements [Peytavie(2010)] ou des foules de personnages [Maïm et al.(2007)] prêts à l'emploi. Des langages de description d'environnements virtuels comme X3D ou X-VRML, incluant la description des interactions et de la dynamique, ont été utilisés un temps, mais rapidement éclipsés par la fonctionnalité de description graphique de scènes proposées dans les moteurs de jeu vidéo.

3.1.1 Dynamisme et interactivité

Dynamisme et interactivité sont deux propriétés primordiales, et de surcroît liées l'une à l'autre. L'interactivité, à savoir la capacité de l'environnement à pouvoir être manipulé par l'apprenant est une composante caractéristique d'un environnement d'apprentissage qui le différencie d'autres modalités de transmission des savoirs. La prise en compte des «entrées» de l'apprenant s'accompagne nécessairement de modifications qui doivent être reflétées dans l'environnement de manière dynamique. En outre, l'environnement se doit également d'évoluer selon des règles intrinsèques comme des rythmes ou phénomènes naturels, etc. Il existe plusieurs degrés d'interactivité, chacun s'associant à des objectifs variés. Par exemple, les jeux dans le thème de la préservation du patrimoine (*cultural heritage*), s'axent principalement autour de l'exploration de sites ou d'objets reconstitués avec fidélité [Anderson et al.(2010)]. Dans les jeux sérieux thérapeutiques, psychiatriques [Fovet et al.(2016)] ou physiques [Interactive(2012)], les interactions mises en œuvre sont simples et stéréotypées pour être facilement mises en relation avec les objectifs. Lorsque les objectifs de l'apprentissage confrontent l'apprenant à un phénomène physique, comme dans un simulateur de chirurgie laparoscopique par exemple [Ayodeji et al.(2007)], ou encore un entraînement aux gestes techniques de la soudure [Da Dalto(2004)], la précision des interactions s'affine pour rendre compte des subtiles différences entre novices et experts. Enfin, lorsque l'apprentissage intègre les facteurs humains [Fabre et al.(2006)] et/ou la collaboration avec d'autres joueurs ou personnages, les interactions proposées se complexifient pour permettre l'expressivité nécessaire des nombreuses raisons qui peuvent mener à une situation défavorable.

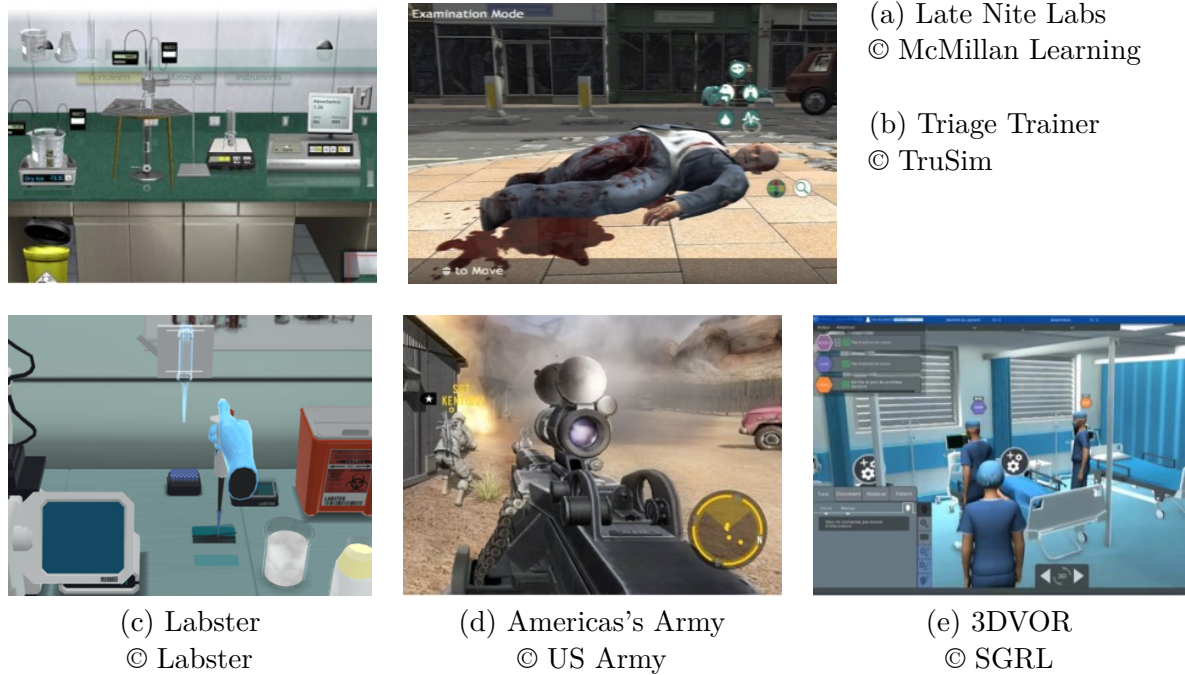


FIGURE 3.1 – Il existe différents degrés d'intégration de l'utilisateur dans l'environnement virtuel : depuis une représentation uniquement par l'interaction jusqu'à sa représentation graphique par un avatar vu à la 3^{ème} personne.

3.1.2 Intégration utilisateur et collaboration

L'environnement est une représentation graphique de la situation dans laquelle les interactions sont rendues possibles. Dans cet environnement, l'utilisateur peut être intégré de différentes manières, comme illustré dans la figure 3.1. Ces différents degrés d'intégration reflètent autant une contrainte technique qu'une recherche de pertinence pédagogique. La première solution (a) consiste à présenter l'environnement comme un espace d'interactions schématisées dans lequel l'utilisateur ne bénéficie d'aucune représentation. L'environnement est présenté en 2D ou 3D de manière indifférente, puisqu'aucun contrôle du point de vue n'est rendu possible ou même nécessaire. Ce type de représentation est préférable pourvu que les objectifs pédagogiques ne l'excluent. En outre, il a été montré par [Richards & Taylor(2015)] pour une tâche d'apprentissage d'un théorème que la comparaison entre un environnement 2D (NetLogo) et 3D (Unity3D) tournait en faveur de la 2D, qui occasionne un meilleur apprentissage, là où la 3D n'apporte aucun bénéfice, sinon distraction et surcharge cognitive inutile. Dans les jeux d'apprentissage immersifs cependant, toutes les dimensions de l'environnement sont pertinentes et l'environnement 3D constitue la norme de représentation de la situation. Pour autant, l'utilisateur ne bénéficie pas forcément d'une représentation et peut continuer à agir dans l'environnement par le biais d'interactions schématisées (b). C'est un choix particulièrement pertinent dans les environnements collaboratifs où les utilisateurs sont physiquement regroupés, par exemple dans un CAVE (voir figure 4.4, p. 55). Un état de l'art détaillé des modèles pour la collaboration dans les environnements virtuels pourra être trouvé dans [Duval(2012)]. Le sujet

de la collaboration avec d'autres personnages virtuels, joueurs ou non-joueurs, est traité dans la section 5.1.

La première véritable représentation qu'on puisse donner à l'utilisateur est celle de ses mains, par lesquelles il effectue les interactions. Elle se justifie lorsque la dimension technique de l'interaction revêt un intérêt pédagogique, comme dans (c) où les gestes manipulatoires sont importants. Ce type de représentation s'impose de manière croissante car elle est parfaitement adaptée aux dispositifs d'immersion sensorimotrice individuels comme les casques de VR qui bénéficient depuis quelques années d'un regain d'intérêt. Outre la représentation de ses mains, l'utilisateur peut se voir accorder la possibilité de modifier son point de vue dans l'environnement pour l'explorer librement (d). On parle alors de représentation à la 1^{ère} personne, qui est très populaire dans les jeux vidéo car elle fournit un degré d'immersion important tout en restant compatible avec de nombreux dispositifs d'affichage (casque VR, clavier+souris, contrôleur de jeu). Enfin, l'utilisateur peut se voir intégré dans l'environnement sous la forme d'un avatar (d) qu'il voit et contrôle à la 3^{ème} personne. Cette intégration propose plusieurs avantages pour l'utilisateur non familier des environnements 3D : celui-ci se repère plus aisément, et le contrôle de l'avatar est facilité, par le pointer-cliquer sur la destination par exemple ; les animations de l'avatar et les collaborations sont plus explicites et induisent une meilleure compréhension de la situation ; enfin, il est possible de superposer des contrôles 2D à l'environnement 3D, comme illustré dans (e), sans nuire à l'ergonomie du jeu.

Les objectifs pédagogiques du jeu d'apprentissage immersif, ainsi que les contraintes de la formation (geste technique, collaboration, etc.), ont une influence importante sur les choix technologiques de l'environnement dans lequel l'activité doit être restituée. Ces choix eux-mêmes vont conditionner les propriétés d'immersion et d'interaction qui seront proposées aux apprenants, et doivent dès lors être anticipés tôt dans la phase de conception.

3.1.3 Réalisme versus *fun*

La question du degré de réalisme que doit exposer l'environnement est une question qui n'accepte pas de réponse franche. On prête des propriétés pédagogiques avantageuses au réalisme des représentations, des interactions et des situations : en particulier, on imagine qu'un plus grand réalisme facilite la transposition des savoirs nouvellement acquis de l'EV3D vers l'environnement d'exécution réel de la tâche. De même, il facilite l'appropriation de l'EV3D par l'apprenant qui peut y transposer des schèmes mentaux existants de son activité professionnelle. Cependant, le réalisme peut également jouer un rôle contre-productif, par exemple lorsque le réalisme visuel n'est pas assorti avec le réalisme fonctionnel : [Petridis et al.(2010), p.28] donnent l'exemple simple d'un téléphone placé sur un bureau pour accentuer le réalisme d'une scène, mais rupteur d'immersion lorsque le joueur essaie sans succès de décrocher ou de passer un appel. Même lorsque les objets sont tous fonctionnels, trop de réalisme dans une scène peut devenir écrasant pour l'apprenant, qui ne sait pas ce qu'on attend de lui, ou bien sait ce qu'il doit faire mais ne trouve plus de repères familiers. En outre, [Ricca et al.(2020)] ont montré dans l'apprentissage d'un geste technique qu'une fidélité plus importante de la représentation et de l'interaction

n'avaient pas eu d'impact significatif. En conséquence, les efforts supplémentaires requis et le matériel plus coûteux ont été jugés comme superflus. Pour [Lourdeaux(2001)], «le réalisme n'est pas une fin en soi. On recherche plutôt dans un contexte pédagogique la pertinence de l'environnement et des activités ; la simplification et l'ellipse peuvent être justifiées par la pédagogie qu'on décide de mettre en œuvre». En outre, les objectifs de la transmission de savoirs justifient la possibilité d'ajouter des éléments ou des phénomènes non réalistes (dans le sens où ils sont normalement invisibles ou imperceptibles pour nos sens) mais pédagogiquement pertinents, ce que [Thouvenin(2009)] résume par «Il s'agit bien de traduire [des sensations] et non de reproduire». Par exemple, donner une représentation aux vents ou aux courants marins dans un jeu pour l'apprentissage de la voile, appliquer aux pièces d'une machine un gradient de couleur selon leur échauffement dans un jeu d'usinage, ou encore renforcer les émotions de personnages virtuels avec des émoticônes. Défini dans [Bowman et al.(1999)], un *Information-Rich Virtual Environment* est un environnement 3D (de réalité virtuelle ou non) annoté et enrichi avec des informations symboliques, concrètes ou abstraites, qui permettent à des utilisateurs ou des apprenants de compléter leur perception de l'environnement, de manière à améliorer la compréhension d'un phénomène ou de collaborer [Aubry(2007)]. Par extension, on peut mentionner toutes les aides visuelles classiquement utilisées pour l'accompagnement utilisateur (par exemple, attirer l'attention de ce dernier sur un objet en le mettant en surbrillance) qui n'ont rien de réaliste mais participent tout de même à l'immersion et au *flow*.

Au réalisme de l'expérience proposée, on oppose souvent la notion de *fun*, c'est à dire le plaisir ludique que les jeux sérieux aspirent à emprunter, avec plus ou moins de réussite, aux jeux «non-sérieux». Penser que le *fun* et le réalisme sont deux notions contradictoires est une idée fausse répandue. [Malone(1980)] identifie de nombreuses propriétés qui rendent un jeu amusant (parmi lesquelles : un objectif clair, des retours fréquents, une issue incertaine, etc.), qui ne sont pas contradictoires de la notion de réalisme. Dans la pratique cependant, on constate que les attentes en termes de *fun* et de réalisme diffèrent suivant les publics, et le concepteur fait souvent l'effort de se conformer à ces attentes pour ne pas pénaliser l'acceptabilité de son jeu. Par exemple, un élève de collège ou de lycée, qu'il soit déjà joueur ou non, sera naturellement séduit par chaque effort fait dans le sens du divertissement qu'il ne trouve pas nécessairement dans les apprentissages plus traditionnels qui lui sont proposés : *gameplay*, narration, liberté des actions, compétition, etc. En revanche, un professionnel sera plus attentif au réalisme de l'environnement de formation (familiarisation facilitée, anticipation de la transposabilité) et à son contenu (anticipation du bénéfice sur son activité professionnelle) [Gilibert & Gillet(2010)].

3.1.4 Notion d'environnement «informé»

Un environnement informé, défini formellement dans [Donikian(2004)], est un environnement dans lequel les représentations graphiques (géométrie, textures, etc.) des objets qui s'y trouvent sont enrichies d'informations sémantiques sur la nature, la fonction ou la dynamique de ces objets. Le monde virtuel tel qu'il est perçu par les utilisateurs à travers l'écran ou le casque de VR ne constitue que la représentation graphique d'un environnement existant à un niveau essentiel, qu'on appelle «environnement sémantique»

(voir section 3.2). Celui-ci décrit les propriétés internes des objets ou des personnages de l'environnement, qui ont vocation à être exploitées par le jeu pour paramétrer leurs représentations ou bien régir leur évolution. L'environnement informé ne doit pas être confondu avec le concept proche d'environnement «annoté» (mentionné p.45) dans lequel des informations d'ordre sémantique sont simplement présentées à l'utilisateur.

L'environnement informé propose une implémentation informatique de la très célèbre théorie des affordances de [Gibson(1979)] en explicitant dans chaque objet de l'EV3D les possibilités d'interaction et leur résultat. Ce concept est développé dans le chapitre 4 consacré aux interactions. Les informations sémantiques peuvent aussi être exploitées pour le suivi d'un scénario, comme dans [Jeanne & Thouvenin(2015)] où elles guident la réalisation d'un geste technique par l'utilisateur. Ces informations, invisibles pour l'apprenant, sont accessibles aux personnages virtuels autonomes qui évoluent dans l'EV3D, et leur donnent accès à un niveau de compréhension suffisant pour leur permettre de participer. Ainsi, dans [Edward et al.(2009)] et [Sanselone et al.(2014b)], les agents autonomes coopèrent ou collaborent avec les joueurs grâce aux informations relatives aux règles de l'environnement disséminées à l'intérieur de ce dernier. Enfin, dans le même esprit, l'environnement informé peut également servir de support à l'implantation de tuteurs virtuels [Taoum et al.(2016)].

3.2 Modélisation sémantique de l'environnement

Le modèle sémantique de l'environnement est issu de la modélisation du scénario et de l'activité, ou alternativement co-construit. En effet, les interactions identifiées lors de cette étape (décrite dans le chapitre 2) sont nécessairement ancrées sur des objets de l'environnement, dont elles consistent par ailleurs à faire évoluer les états et les propriétés au fil de l'activité. L'analyse de ces interactions permet donc d'établir deux types de représentations des objets qui doivent figurer dans l'environnement d'apprentissage :

- Les représentations statiques modélisent les connaissances afférentes à la nature ou la fonction des objets (leurs propriétés et leurs états, leurs capacités d'interaction exposées sous forme d'*affordances*, etc.) ou les relations entre les objets (ontologies de concept, etc).
- Les représentations dynamiques décrivent l'évolution de ces états au cours du temps ou au gré des interactions, en adoptant des formalismes adéquats (systèmes à base de règle, machine à états, etc).

Deux facteurs influent sur la granularité de la description sémantique d'un objet : la précision du recueil de connaissances d'une part, mais surtout le rôle pédagogique de l'objet vis à vis des objectifs. De ce fait, chaque objet peut se voir défini de manière très sommaire ou au contraire bénéficier d'une simulation très fine de son fonctionnement. Par exemple, dans le projet MASCARET, [Chevaillier et al.(2012)] décrivent un méta-modèle basé sur UML regroupant tous les outils nécessaires à la description d'une ontologie du domaine concerné (des opérations sur un porte-avion par exemple dans l'article), de la structure de l'environnement, des interactions des utilisateurs, de leur activité ainsi que celles des agents virtuels. Ce meta-modèle prend la forme de deux composants complémentaires, VEHA et HAVE, qui permettent respectivement de décrire un environnement virtuel in-

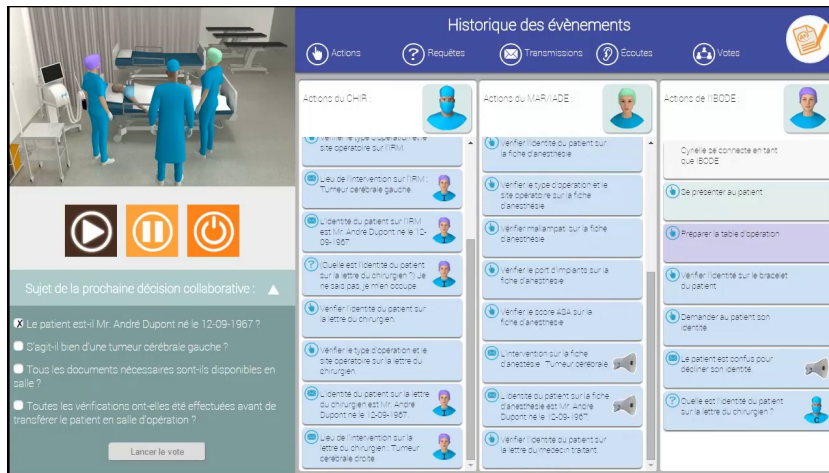


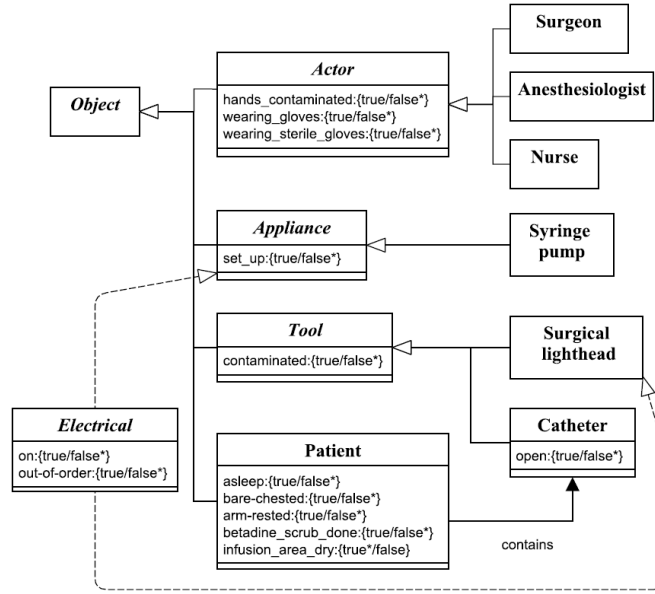
FIGURE 3.2 – La vue du formateur offre une représentation dynamique synthétique de l'activité des joueurs, ainsi que modalités de contrôle des événements pour influencer sur le déroulement du scénario.

formé et structuré, et une activité humaine dans cet environnement. Dans le projet V3S, le module HERA [Barot et al.(2013)] combine un modèle du domaine, qui se présente sous la forme d'une ontologie, et un modèle d'activité. Les auteurs relèvent la difficulté de concilier des représentations valides pour les experts avec des modèles computationnels directement exploitables par l'outil informatique. [Gerbaud et al.(2008)] présentent dans le projet GVT une logique descriptive similaire, appelée STORM, qui a la particularité de mettre l'accent sur la description de la relation entre les objets lors d'une interaction. Dans le projet 3DVOR [Panzoli et al.(2017)], le modèle sémantique utilisé (décrit dans la section 3.4) est volontairement restrictif en terme d'expressivité pour mieux permettre d'y faire opérer un algorithme d'IA auquel est confié le contrôle des personnages non-joueurs qui coopèrent avec les apprenants.

3.3 Environnement formateur

L'implication du formateur dans la formation est une contrainte récurrente dans un jeu d'apprentissage immersif. Le formateur peut être placé dans l'environnement de formation, au contact du ou des apprenants par le biais de son propre avatar. Il peut ainsi suivre l'action en direct et potentiellement intervenir et participer aux activités, voire même débriefer la séquence de jeu *in situ*. C'est la logique retenue dans les jeux médicaux Clinispace [Parvati & Heinrichs(2011)] et 3diTeams [Taekman et al.(2007)]. À l'opposé, le formateur peut se voir fournir une représentation spécifique, qu'on appelle parfois «pupitre formateur», dans laquelle le niveau d'abstraction de l'information qui lui est présentée est supérieur à celui des apprenants (voir la figure 3.2). Les informations lui sont ainsi présentées filtrées, ou sous une forme agrégée, afin de lui permettre un suivi confortable de l'activité, voire de l'assister en pointant en temps réel les erreurs des apprenants. Dans ce cas aussi, le formateur peut dépasser son rôle d'observateur et se voir doté de la capacité d'influer sur le déroulement du scénario en modifiant certains paramètres ou en déclenchant certains événements.

FIGURE 3.3 – Extrait de l'environnement «sémantique», représenté par l'ensemble des propriétés des objets (mobilier, outils, consommables, acteurs) qui le composent. Les valeurs des propriétés sont restreintes à des booléens afin de permettre l'application d'un algorithme d'IA pour le contrôle des personnages non-joueurs. Les arcs en pointillés représentent les interfaces, les pleins les relations d'héritage.



3.4 Contributions

Mes contributions à l'état de l'art en ce qui concerne la conception d'environnements virtuels interactifs pour la formation sont détaillées dans les paragraphes suivants.

L'environnement collaboratif de 3D-VOR

Comme illustré dans la figure 3.3, l'environnement virtuel de 3D-VOR est décrit de manière sémantique, c'est à dire par des propriétés et des valeurs, et indépendamment de sa ou ses représentations graphiques. L'environnement sémantique est centralisé et affiché sous forme graphique sur les écrans de chacun des apprenants collaborant lors d'une session de jeu. Les différentes projections graphiques de l'environnement sont interactives, et chaque interaction se traduit par des changements d'états de l'environnement centralisé, qui sont ainsi automatiquement reflétés pour tous les apprenants. Les détails du modèle, et la manière dont environnements sémantique et graphique interagissent, ont été publiés dans [Panzoli et al.(2014)].

La spécificité de l'implémentation proposée dans 3D-VOR est de contraindre le type de chaque propriété à des valeurs booléennes. Par exemple, dans le diagramme de la figure 3.3, la seringue autopulsée (`syringe_pump`) peut-être allumée ou éteinte (`on:true/false`), fonctionnelle ou hors-service (`out-of-order:true/false`) et éventuellement contaminée (`contaminated:true/false`). Cette standardisation, limitative de prime abord, permet en fait deux contributions majeures du projet 3D-VOR :

- La première concerne la possibilité de caractériser n'importe quel état de l'environnement par un vecteur de booléen, et de faciliter la mesure de distance entre deux états. C'est le fondement de l'application de l'algorithme d'IA, décrit plus en détail dans la section 5.5, qui permet de remplacer n'importe quel acteur par un personnage non-joueur.

3.5 Bilan du chapitre

Les espoirs d'efficacité pédagogique dans un jeu d'apprentissage immersif sont fondés sur la liberté importante accordée au joueur dans l'exploration de l'environnement et de ses règles (principe du *learning by doing* de l'apprentissage expérientiel). Naturellement, cette liberté impose une contrainte importante sur les méthodes de scénarisation, par opposition à des approches plus classiques telles que celle du *e-learning* où l'apprentissage est guidé de manière plus directive. Ici, la trajectoire de l'apprenant ou du groupe d'apprenants est très peu prévisible, et l'exploration de l'environnement peut rapidement dévier de la poursuite des objectifs pédagogiques définis. Le contrôle du scénario est donc une problématique récurrente dans la conception d'un jeu d'apprentissage immersif.

De plus, le bénéfice de l'approche tient à la capacité des concepteurs à capturer avec une grande précision les propriétés de l'environnement d'apprentissage d'une part, et ses dynamiques d'autre part. Jusqu'à présent, les représentations statique et dynamique de l'environnement sémantique font l'objet de modélisations séparées, l'une étant attachée à l'EV3D (statique) et l'autre à la scénarisation (dynamique). Or, cela signifie que chaque discordance ou conflit n'apparaît qu'à une phase tardive de la mise en œuvre de l'environnement, lorsque ces deux représentations sont conciliées. Un des défis associés à notre projet de recherche décrit une approche différente dans laquelle l'environnement serait abordé d'un point de vue fonctionnel, préalablement à toute tentative d'en définir les propriétés et les dynamiques d'évolution (voir p.96). Cette approche fonctionnelle vise à produire une description logique de l'environnement d'apprentissage, dans laquelle est décrit de manière hiérarchique le rôle des systèmes et des objets, ainsi que leur participation dans l'activité, sans considération préalable particulière pour leur nature.

4 | Conception et ergonomie des interactions pédagogiques

Implémenter les interactions pédagogiques

Dans ce chapitre, nous explorons les moyens techniques et les méthodes de conception qui permettent d'implémenter de manière effective l'interaction entre l'apprenant et l'environnement virtuel de formation tel qu'il a été modélisé dans la phase précédente. Les décisions qui sont prises à cette étape conditionnent très largement l'expérience utilisateur finale. Elles devront tenir compte de contraintes technologiques et financières, principalement liées au matériel, mais aussi de critères pédagogiques influant sur la pertinence avec laquelle le jeu d'apprentissage immersif parviendra à atteindre ses objectifs.

Sommaire du chapitre

4.1	L'espace des interactions	51
4.1.1	Immersion de l'utilisateur	52
4.1.2	Cybermaladie	56
4.2	Mise en œuvre de l'interaction	57
4.2.1	Interactions 3D et pertinence pédagogique	57
4.2.2	Manipulations physiques et métaphores d'interactions	58
4.3	Contributions	61
4.4	Bilan du chapitre	64

4.1 L'espace des interactions

Dans le chapitre précédent, l'interaction observée et numérisée par le questionnaire des connaissances a été scénarisée dans l'EV3D : cela signifie que les objets sur lesquels elle porte ont été décrits, et ses conséquences ont été modélisées. L'étape abordée dans ce chapitre consiste à la mettre en œuvre dans l'environnement virtuel, c'est à dire donner les moyens à l'utilisateur de la réaliser effectivement, dans les conditions de son choix, et éventuellement d'échouer.

D'un point de vue technique, la mise en œuvre des interactions est rendue accessible par l'utilisation des fonctionnalités du moteur de jeu, d'API logicielles fournies par les

constructeurs de matériel VR (comme *ReactVR* pour *Oculus*), ou encore par certains progiciels ou *middleware* technologiquement agnostiques comme *OpenVR* de *Valve*, *MR toolkit* de Microsoft, *MiddleVR*, *OpenMask*, etc. [Steed(2008)] recommande le développement des composants de haut niveau pour s'accommoder de la multiplicité des matériels et de leur évolution rapide. C'est la stratégie de nombreux studios qui développent leurs propres *frameworks* ajustés à leurs besoins. La communauté scientifique vise plus loin et concentre ses efforts sur la proposition de modèles de description externalisés, comme InTml (*Interaction Technique Markup Language*) de [Figuerola et al.(2008)], pouvant être projetés de manière automatisée sous forme d'environnements de VR interactifs et fonctionnels.

L'interaction, outre son aspect fonctionnel primordial puisqu'elle est pour l'utilisateur le seul moyen de progresser dans le scénario, joue un rôle avéré dans la sensation de présence ressentie par l'utilisateur. En effet, [Sas et al.(2004)] établissent une corrélation entre le nombre de collisions (i.e. d'interactions) entre l'utilisateur et l'EV3D et la sensation de présence perçue par l'utilisateur. L'effet Proteus est une autre illustration des relations étroites qu'entretiennent les interactions avec l'immersion de l'utilisateur. Il met en lumière des comportements différents de l'utilisateur en fonction de la représentation qui lui est donnée dans l'EV3D : par exemple, la taille de l'avatar joue sur la confiance de l'utilisateur [Freeman et al.(2014)]. Il a également été montré que les effets observés dans l'EV3D perdurent au delà de l'expérience immersive [Yee et al.(2009)], ce qui rend cet effet intéressant pour l'apprentissage. [Slater(2017)] suggère ainsi que cet effet pourrait être utilisé pour favoriser des apprentissages implicites, en plaçant l'apprenant dans un corps différent (force physique accrue, couleur de peau différente, etc.) à dessein.

4.1.1 Immersion de l'utilisateur

Tout commence par un choix : quel est le degré d'intégration de l'utilisateur le plus pertinent relativement aux objectifs pédagogiques de la formation ? Il existe un continuum dans l'espace des modalités d'interaction, aux extrémités duquel on distingue deux grandes catégories de solutions, qui sont illustrées dans la figure 4.1. La figure 4.1a qui illustre un prototype académique du jeu 3D Virtual Operating Room montre un environnement en 3D mais dans lequel les joueurs ne peuvent pas modifier leur point de vue, et dans lequel les interactions accessibles sont présentées comme des étiquettes de texte à cliquer. À l'opposé, l'environnement de formation EMILY de la figure 4.1b, développé par le studio Numix, met en avant un environnement de réalité virtuelle immersif dans lequel le joueur manipule des outils avec ses mains (par l'entremise des contrôleurs) pour effectuer des actions au plus proche de la réalité.

On parle d'immersion sensori-motrice pour désigner le niveau physiologique auquel œuvrent les techniques décrites dans cette section, par opposition par exemple à l'immersion cognitive d'une tâche absorbant l'utilisateur ou l'immersion émotionnelle d'une scénarisation réussie. D'un point de vue technique, les technologies de la VR offrent plusieurs alternatives, permettant d'accéder à des profondeurs différentes dans l'immersion sensori-motrice de l'apprenant, mais malheureusement au prix de contraintes proportionnellement dissuasives.

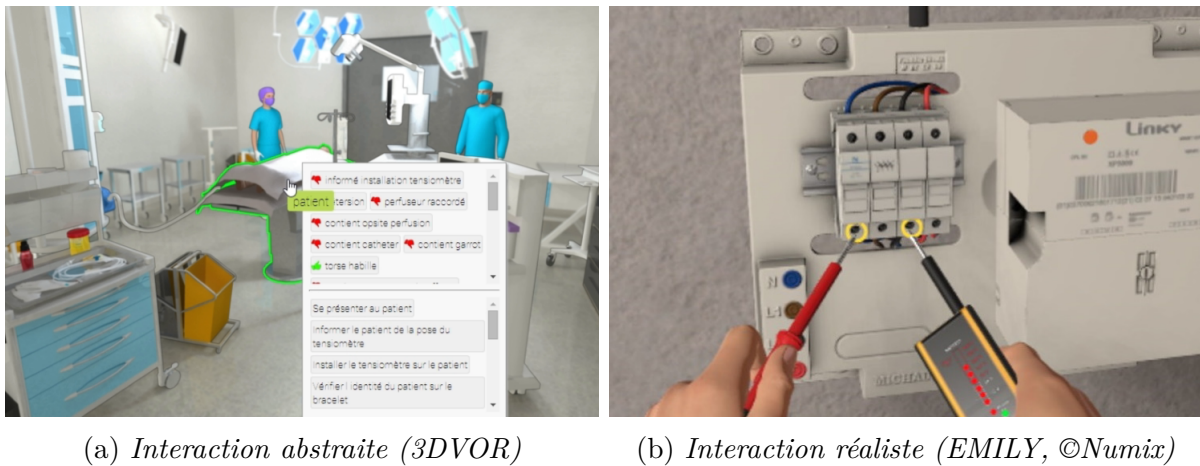


FIGURE 4.1 – Suivant les objectifs pédagogiques, les interactions en EV3D peuvent être fortement abstraites pour concentrer l'attention de l'apprenant sur le respect de la procédure, ou au contraire préserver le réalisme de chaque geste métier.

VR non immersive La VR non immersive (on trouve aussi en anglais le terme *Desktop-VR*) consiste en la présentation de l'EV3D à travers un écran classique (moniteur). Les interactions qui y sont associées en principe reposent sur l'utilisation de la souris et du clavier (figure 4.2a). Toutefois, certains environnements d'apprentissage qui s'orientent vers la simulation d'entraînement au geste métier peuvent recourir à des dispositifs d'entrée spécifiques (figure 4.2b). La VR non immersive ne proposant aucune forme d'immersion sensori-motrice, l'appellation pourrait sembler trompeuse, ou pour le moins oxymorique. Cependant, [Robertson et al.(1997)] défendent que des signaux visuels appropriés ainsi que des animations interactives sont tout de même aptes à susciter chez l'utilisateur une sensation d'immersion, malgré l'absence de contrôle du point de vue. En outre, on peut également reconnaître le potentiel de telles applications pour exhiber d'autres niveaux d'immersion : cognitive, émotionnelle, etc.

Parmi les qualités de ce type de dispositif, on relève sa très grande accessibilité : le matériel est peu onéreux (sauf pour les simulateurs) et les utilisateurs sont familiers de l'utilisation d'un clavier et d'une souris. Une seconde qualité, qui peut se révéler utile dans un contexte d'apprentissage, c'est que l'utilisateur n'a pas l'exclusivité de la vision de l'environnement, qui peut-être partagée avec d'autres apprenants ou un formateur. Du point de vue de l'intégration de l'utilisateur, la VR non immersive autorise aussi bien la vue à la 1^{ère} personne qu'à la 3^{ème} personne.

VR immersive Elle se caractérise par l'utilisation de dispositifs matériels aptes à produire une véritable immersion sensori-motrice. En premier lieu, on trouve les casques de réalité virtuelle, enfin passés à la postérité auprès du grand public 50 ans après l'invention par Ivan Sutherland en 1968 de « l'épée de Damoclès », le premier dispositif à vision stéréoscopique proposant une adaptation de la perspective en fonction des mouvements de tête de l'utilisateur.

Il existe aujourd'hui sur le marché un nombre croissant d'appareils de conception



(a) Des lunettes spécifiques permettent d'obtenir un effet 3D stéréoscopique (b) Simulateur d'entraînement à la chirurgie laparoscopique par 3D Systems.

FIGURE 4.2 – La réalité virtuelle non immersive affiche l'environnement sur un écran d'ordinateur. L'utilisation du couple clavier/souris est habituel mais d'autres périphériques d'entrée sont possibles : souris 3D, dispositif haptique, etc.



(a) Le clavier et la souris sont mal adaptés à la VR immersive. (b) Les contrôleurs 6 DDL offrent une bonne ergonomie dans les interactions immersives à la 1^{ère} personne.

FIGURE 4.3 – Dispositifs de réalité virtuelle immersive.

similaire : un casque muni de deux écrans reproduisant chacun le point de vue d'un oeil ainsi que des gyroscopes capables de communiquer à l'environnement l'orientation de la tête de l'utilisateur ; et deux contrôleurs à 6 degrés de liberté (6 DDL : positionnement et rotations sur les 3 axes) permettant de manipuler l'environnement (voir figure 4.3b). Certains proposent ce dispositif sans fil, d'autres ajoutent des capteurs pour positionner de manière absolue un utilisateur dans un périmètre donné, etc. Indépendamment de cela, tous proposent une expérience utilisateur équivalente. Le coût des casques de VR a été réduit considérablement par l'engouement du grand public (qui ne semble pourtant pas avoir perduré) et la production de masse. Cependant, les entreprises en bénéficient encore et proposent des formations VR immersives de qualité à un coût abordable.

L'intégration de l'utilisateur est par nature individuelle et exclusive, même si la vue à la 1^{ère} personne de l'utilisateur peut être projetée sur un écran à l'attention d'autres utilisateurs ou du formateur. En revanche, le sentiment de présence de l'utilisateur dans l'environnement 3D est immédiat, prégnant et indéniable, même après une relative accoutumance. Les interactions sont fortement contraintes. Le port du casque de VR rend dissuasive l'utilisation du couple clavier/souris, comme on peut l'imaginer dans la figure 4.3a. Les manipulations avec les contrôleurs 6 DDL, prévus pour répondre à la richesse des interactions dans les jeux vidéo, peuvent rapidement devenir écrasantes pour un public non initié, et généralement on cherchera à proposer des contrôles adaptés, dans le respect bien entendu des objectifs pédagogiques [Petridis et al.(2010), p.28]. Enfin, des dispositifs d'entrée comme *Microsoft Kinect* ou *Leap Motion* intègrent des algorithmes de reconnaissance des gestes et des postures qui peuvent rendre plus naturelles les interactions avec l'EV3D.

Les CAVE (pour *CAVE Automatic Virtual Environment*, illustré dans la figure 4.4) constituent une alternative qu'on dit désuète depuis l'avènement des casques de RV, mais qui sont pourtant très présents dans les grandes entreprises. Inventés, au début des années 1990 [Cruz-Neira et al.(1992)], ils avaient pour objectif de réunir dans un même espace plusieurs utilisateurs et leur offrir une expérience immersive. Les CAVE autorisent certains usages, comme par exemple la communication ou la collaboration, qui sont très compliquées à mettre en œuvre ailleurs de manière aussi naturelle. L'interaction avec l'EV3D en revanche est complexe.



FIGURE 4.4 – Le CAVE reste un moyen efficace pour proposer une expérience immersive collaborative.

Enfin, on notera qu'en corollaire de l'adoption des dispositifs VR grand public, la panoplie des dispositifs de contrôle spécifiques (voir par exemple [Fuchs et al.(2006)]) qu'on retrouve dans de nombreux simulateurs n'est pas réellement utilisée dans les jeux d'apprentissage immersifs. Le couple clavier-souris (VR non immersive) et les contrôleurs 6DDL (VR immersive) figurent dans la quasi-totalité des applications, ce qui apporte également une certaine standardisation du contrôle de laquelle les utilisateurs se plaignent rarement, mais au détriment de sensations plus authentiques, telles que les retours haptiques qui participent beaucoup de la boucle sensori-motrice. On notera des efforts pour ré-intégrer cette dimension notamment grâce à l'emploi de techniques comme le retour pseudo-haptique [Hachisu et al.(2011)] qui permet de produire des «illusions haptiques» en trompant la perception de l'utilisateur.

4.1.2 Cybermaladie

Au revers des nombreuses possibilités offertes par les dispositifs immersifs, la cybermaladie (*cybersickness* ou *VR-sickness* en anglais) menace l'adoption de la réalité virtuelle pour la formation. Elle se présente sous plusieurs formes.

Une sensation d'inconfort prononcé, qui se traduit généralement par l'apparition de nausées, est le premier symptôme. Il s'exprime lors des changements du point de vue (orientation de la tête avec un casque VR par exemple) et particulièrement lors des déplacements (cybercinétose liée à la vection¹² dans l'EV3D). Il est ressenti (dans les tâches qui s'y prêtent) par 40–70% des utilisateurs, dès 15 minutes d'immersion [Munafo et al.(2017)]. Deux facteurs explicatifs ont été identifiés : La première explication (et la plus influente, voir [Ng et al.(2019)] pour une comparaison) est un simple conflit sensoriel¹³. La deuxième incrimine une instabilité posturale pour expliquer les disparités individuelles (et notamment de genre) dans le ressenti des symptômes. Dans le cas de l'observation depuis un référentiel fixe, la diminution des taux de latence des casques VR a considérablement amélioré le confort des expériences immersives. Dans le cas du déplacement, quelques dispositifs logiciels permettent de diminuer l'inconfort, comme le «floutage» de la zone de vision périphérique [Fernandes & Feiner(2016)] ou l'ajout de «supports fixes» [Cao et al.(2018)] comme par exemple un nez virtuel.

Dans un casque VR, la distance entre les yeux et les objets observés est différente de celle avec les écrans sur lesquels ces derniers sont affichés. Il en résulte un conflit dit d'accommodation-vergence, provoquant une fatigue oculaire rapide qui s'exprime par une sensation de migraine. Ici aussi, des solutions logicielles peuvent améliorer le confort de l'expérience [Leroy et al.(2012)].

La cyber-maladie est liée à la solution technique employée : elle est absente de la VR non immersive, ce qui explique (entre autres) la prédominance de ce choix technique dans

12. La vection désigne une perception visuelle d'un déplacement du corps mouvement sans perception vestibulaire, comme par exemple dans un train. Dans un environnement immersif, c'est le cas de tous les déplacements.

13. En fait, la latence provoquée par le dispositif sur l'orientation est interprétée par l'organisme comme le résultat possible de l'ingestion d'une toxine hallucinogène... qu'il va donc naturellement chercher à expulser !

la plupart des formations. Dans les environnements immersifs, on ajustera la durée des sessions de formation à la durée maximale avant l'apparition des premiers symptômes gênants [Kourtesis et al.(2019)]. Une bonne façon de maximiser cette durée effective est de prendre en compte les contraintes de la cyber-maladie lors de la mise en œuvre des interactions.

4.2 Mise en œuvre de l'interaction

Du processus de conception pédagogique (cf. chapitre 3), en amont de la phase de conception ergonomique, ont résulté des choix quant au niveau de détail attendu des interactions de l'utilisateur. Les choix ergonomiques qui s'ensuivent sont généralement contraints par cette notion de granularité, mais également par un souci de transposabilité des compétences acquises. En d'autres termes, le choix pertinent d'une interaction est celui parmi les options possibles qui, une fois maîtrisé l'apprentissage d'un geste métier ou l'acquisition d'une conscience de la situation, sera le plus naturellement adopté dans la situation réelle.

4.2.1 Interactions 3D et pertinence pédagogique

L'interaction 3D est le terme utilisé dans la discipline des interfaces hommes-machines (IHM) pour faire référence aux interactions dans un EV3D. Le cadre conceptuel de référence est la classification proposée par Bowman [Bowman(1999)], qui reconnaît que toutes les interactions dans un EV3D n'ont pas la même finalité. Il distingue 4 types de tâches : la sélection, la manipulation, la navigation et le contrôle de l'application. Bien que chaque interaction puisse entrer dans une de ces 4 catégories, certains auteurs ont fait apparaître ultérieurement d'autres formes de catégorisation prenant en compte par exemple la communication [Coquillart et al.(2003)] ou la saisie de symboles [Sternberger(2006)].

Dans un jeu d'apprentissage immersif, les considérations propres aux IHM ne constituent qu'un angle sous lequel une interaction est examinée, l'autre angle étant sa pertinence pédagogique. En d'autres termes, si l'efficacité et le naturel sont des critères importants pour départager deux interactions possibles, la transposition¹⁴ de chacune dans l'environnement réel est le véritable arbitre. Ainsi, [Bossard et al.(2008)] énumèrent les problèmes et les recommandations qui permettent d'assurer la bonne transposition des savoirs acquis. Hormis sa capacité à arbitrer, la pertinence pédagogique d'une interaction pose aussi la question de son utilité. Pour [Wickens(1992)], les interactions représentent le fondement du rôle actif proposé à l'apprenant, et qui favorisent l'acquisition et la rétention des informations, par opposition à la passivité de ce dernier devant une forme d'enseignement plus traditionnelle. Cependant, il note qu'à la charge cognitive liée à la tâche d'apprentissage (compréhension active, décisions, etc.), s'ajoute celle des interactions avec l'environnement virtuel lui-même : navigation, manipulation, menus, etc. En conséquence, les interactions qui n'ont pas de finalité pédagogique directe doivent être

14. On trouve aussi le terme de transfert dans la littérature.

conçues de manière à ne pas requérir trop d'attention de l'apprenant et de distraire le moins possible le processus d'apprentissage, sans quoi les bénéfices de l'outil pourraient être nuls. Par exemple, [Kozak et al.(1993)] ont démontré l'inefficacité d'un apprentissage informatisé en VR pour tâche de manipulation.

4.2.2 Manipulations physiques et métaphores d'interactions

Plus d'un demi-siècle de recherches en réalité virtuelle et en interaction 3D a donné naissance à d'innombrables dispositifs ou techniques offrant à l'utilisateur l'expressivité nécessaire à une gamme quasi-infinie d'applications créatives, ludiques ou sérieuses. Différents états de l'art sont proposés dans [Ouramdane et al.(2009), Jankowski & Hachet(2013)] pour les interactions immersives, dans [Jankowski & Hachet(2015)] pour les interactions non-immersives, et dans [Domingues(2010)] pour les interactions collaboratives, lorsque plusieurs utilisateurs sont concernés. Cependant, seule une fraction de cet héritage est effectivement mobilisé lors de la conception des jeux d'apprentissage immersifs, comme le révèle une certaine standardisation des interactions proposées à l'apprenant dans ces applications. En effet, dans la pratique, le choix de mise en œuvre dans l'EV3D de chaque interaction prévue dans la scénarisation se fait plutôt directement, en faveur d'interactions connues et usitées et souvent au détriment de l'originalité. Ce choix conservateur s'explique par deux raisons : D'une part, on espère d'interactions standardisées qu'elles seront familières de l'utilisateur, et facilitera ainsi son immersion dans le jeu. D'autre part, comme l'explique [Rabardel(1995)], les relations entre l'utilisateur et le système ne sont pas toujours telles que souhaitées par le concepteur. La véritable question qui guide le choix de l'interaction se situe plutôt en amont : elle concerne le choix du degré d'abstraction. En effet, l'interaction sensori-motrice entre l'utilisateur et l'EV (ou le monde réel d'ailleurs) ne représente en fait qu'une partie de l'enjeu, les aspects cognitifs et fonctionnels de l'interaction étant d'autres facteurs à considérer [Fuchs et al.(2002)]. L'auteur identifie 3 niveaux d' I^2 (immersion et interaction) entre l'utilisateur et le système : sensoriel, mental/cognitif et fonctionnel (plus de détails dans [Auvray & Fuchs(2007)]). La prise en compte de ces 3 niveaux offre la possibilité de représenter une tâche donnée dans l'EV3D de plusieurs manières : réplique sensori-motrice, transposition du schème ou métaphore (du plus faible au plus haut niveau d'abstraction). [Lourdeaux(2001)] propose une méthodologie en 6 étapes qui prévoit une décomposition fonctionnelle de chaque tâche en primitive comportementale, chacune faisant ensuite l'objet d'une proposition d'interaction sur la base des objectifs de l'application ainsi que d'autres critères tels que l'expérience des utilisateurs ou les limitations techniques. Pour chacune des catégories d'interaction de la classification de Bowman, il existe donc plusieurs interactions «classiques» qui correspondent à différents niveaux d'abstraction.

La navigation

C'est dans cette catégorie d'interaction que les contraintes pédagogiques s'expriment le plus fortement. Selon [Bowman et al.(1997)], la navigation dans l'EV3D se décompose fonctionnellement en deux tâches : l'orientation, qui permet d'identifier la destination et éventuellement planifier le trajet, et le déplacement à proprement parler, qui constitue la

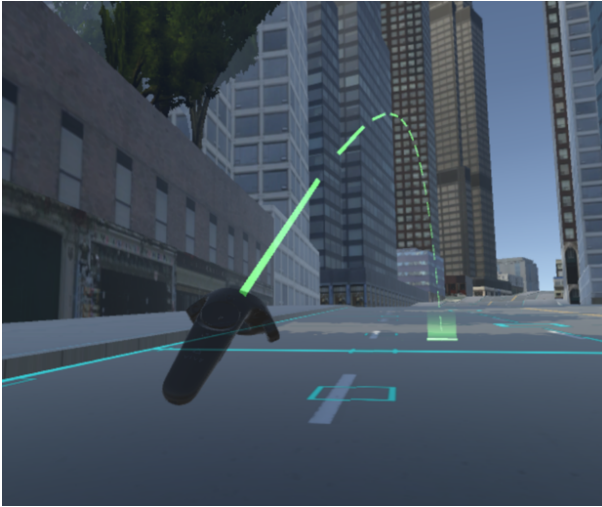


FIGURE 4.5 – L’arc de téléportation est une méthode couramment utilisée dans les EV3D complètement immersifs car elle est facilement prise en main et permet d’indiquer les endroits accessibles. En outre, La téléportation locale ne provoque pas de cybercinétose ni de perte de repère à l’arrivée. Cette méthode est recommandée par les fabricants de casque VR (ici HTC Vive) et incluse dans leurs API.

composante motrice de la navigation. L’orientation est une tâche qui se résout naturellement dans la plupart des cas, au cours du déplacement à l’aide éventuellement d’annotations dans l’environnement, ou d’un plan sur lequel on peut éventuellement sélectionner sa destination directement, comme dans la métaphore du *world in miniature* [Stoakley et al.(1995)]. Le déplacement dans l’EV3D, au contraire, se révèle plus épineux. Le suivi de position du joueur offre la possibilité d’un déplacement naturel et libre, toutefois contraint par la finitude de l’espace réel. Des solutions originales ont été proposées pour y pallier, comme le corridor infini [Matsumoto et al.(2019)] ou les techniques plus générales de redirection de la navigation [Langbehn et al.(2018)]. Certains équipements hauts de gamme prenant la forme de tapis omnidirectionnels permettent une réplique plus ou moins fidèle de la marche mais ils sont très chers, encombrants, et pour ces raisons peu utilisés. Muni de contrôleurs plus abordables, comme une manette de jeu ou un clavier/souris, couple souris/clavier, l’utilisateur peine souvent à contrôler la direction ou la vitesse de son avatar. De plus, c’est cette phase de la navigation qui le rend malade (voir la partie consacrée à la cybercinétose dans la section 4.1.2), bien que des solutions soient proposées [Kemeny et al.(2017)].

Dans la majorité des cas, la préservation du déplacement physique n’est pas une contrainte pédagogique forte (i.e. apprendre à se déplacer ne fait pas partie des objectifs du jeu d’apprentissage), et le public cible n’est pas disposé à s’investir dans une activité inconfortable. Dans ce contexte, la composante motrice de la navigation est simplement éludée, au bénéfice d’une approche fonctionnelle de la navigation. Des métaphores du déplacement sont ainsi proposées, comme la téléportation locale (voir figure 4.5), qui est désormais fournie en standard dans les API des équipements de VR (voir p.51). Une alternative encore plus drastique consiste à opérer des modifications de l’EV3D sans changer le référentiel du joueur. Par exemple, dans [Muller(2019)], l’apprenant passe d’un poste de travail à l’autre en le sélectionnant dans un carrousel virtuel. Le poste sélectionné apparaît ensuite devant lui.

La sélection et la manipulation

Les IHM3D et la VR ne manquent pas de techniques pour manipuler des objets (lire un état de l'art récent dans [Mendes et al.(2019)]), principalement à l'aide de plusieurs poignées de manipulation permettant la modification directe des propriétés d'un objet (position, orientation, échelle) [Nguyen et al.(2014)]. Cependant, dans un jeu d'apprentissage immersif, l'objet est avant tout la représentation visuelle d'un ensemble d'états sémantiques, et les interactions qui ont été décrites lors de la conception portent uniquement sur la modification de ces états. Les interactions qui sont mises en œuvre dans l'EV3D s'inscrivent donc essentiellement dans une logique de pertinence pédagogique. Comme pour la navigation, les objectifs pédagogiques guident le choix pour chacune d'entre elles d'un niveau d'abstraction cohérent : la maîtrise du geste précis est-elle justifiée (réplication sensori-motrice), ou bien seul le résultat de la manipulation est important (approche fonctionnelle ou métaphorique) ? Dans tous les cas, les interactions proposées sont toutefois déclinées à partir d'une modalité commune, pour des questions de cohérence et de productivité.

L'approche fonctionnelle est couramment utilisée dans les applications de VR non immersives ou les outils de type *e-learning*, où les interactions peuvent être présentées de manière contextuelle, comme par exemple dans le prototype de 3D VOR, illustré dans la figure 4.1a. L'interaction bénéficie d'un haut niveau d'abstraction, et son déroulement est assisté, voire éludé, pour ne rendre que le résultat exprimé sous la forme d'un ou plusieurs changements d'états dans l'EV3D. L'interaction est tout de même située : classiquement, elle peut être figurée par une poignée d'interaction attachée à l'objet, ou bien listée parmi plusieurs possibles dans un menu contextuel en surimpression de l'objet. La sélection s'effectue par pointage (pointeur de la souris ou pointeur « laser » [Argelaguet & Andujar(2009)]) à distance, ou bien localement en touchant virtuellement l'objet avec le contrôleur ou une main virtuelle. La validation de la sélection est déclenchée par un bouton du contrôleur ou après un laps de temps calibré. Hormis lorsque les conditions ne sont pas remplies, il n'est pas possible de rater une manipulation. Pour cette raison, ce choix est courant pour concentrer l'attention sur l'enchaînement des tâches, le protocole ou le respect des bonnes pratiques, au détriment de la précision du geste.

Dans les simulateurs pour l'apprentissage, lorsque la précision du geste est un impératif, l'interaction est au contraire modélisée au plus proche de la réalité. C'est le cas par exemple dans l'outil de formation EMILY, développé par Numix, dans lequel chaque geste technique est reproduit avec une grande fidélité. Dans la figure 4.1b, l'apprenant s'est préalablement saisi d'un instrument de mesure dans la boîte à outil, et l'utilise pour effectuer une tâche de mesure de tension où plusieurs erreurs de manipulation peuvent mener à des mesures erronées ou un endommagement du matériel. Dans un tel système, l'association même entre chaque objet de l'environnement et les outils qui permettent sa manipulation (par exemple une vis et un tournevis) doit bénéficier d'une modélisation préalable. Le modèle #FIVE [Bouville et al.(2015)] permet de décrire de telles relations entre les objets et utilise un moteur de relations pour valider les associations permises. L'association de celle-ci avec l'expression de ses conséquences n'est plus aussi directe non plus, l'interaction n'étant plus atomique comme dans le cas précédent. Une certaine graduation du succès doit avoir été anticipée lors de la scénarisation, ainsi que les multiples

conséquences des échecs possibles.

Entre ces deux points de vue antagonistes, l'approche favorisée dans la conception des jeux d'apprentissage immersifs consiste à chercher des compromis entre le réalisme du geste et la facilité d'interprétation de l'interaction. C'est le point de vue défendu dans [Muller(2019)] où l'auteur s'affranchit de l'exécution parfaite du geste en faveur d'une métaphore pédagogique suffisamment proche pour susciter un apprentissage sensori-moteur transposable (voir en détails dans la section 4.3).

Outre la manipulation des objets de l'environnement, une partie importante de l'activité (toute technique qu'elle soit) concerne la manipulation d'informations ou de documents. Les interactions en question concernent la possibilité de saisir des informations (textuelles, numériques, etc.) comme évoqué par [Sternberger(2006)] ou plus simplement de consulter, d'annoter ou d'amender des reproductions de documents qui jouent un rôle dans le déroulement de l'activité : le plus souvent des descriptions du protocole ou des *checklists*. Le VR immersive offre encore peu de liberté quand à la gestion des documents. Intégrés dans l'EV3D, leur faible résolution les rend inconfortables à lire. Affichés en superposition, ils sont encombrants à manipuler. Au mieux les guides de bonnes pratiques des fabricants de matériel VR recommandent-ils l'affichage de quelques informations synthétiques sur une montre connectée ou une tablette virtuelle attachée au poignet de l'avatar du joueur. Pour cette raison, lorsque la phase de conception de l'outil identifie la présence de nombreux documents dont il convient de respecter le format, le choix de la technologie s'orientera vers la VR non-immersive, dans laquelle ces documents peuvent être affichés sur un écran d'ordinateur et manipulés simplement à la souris et au clavier.

4.3 Contributions

En ce qui concerne l'ergonomie des interactions entre des apprenants et un environnement immersif d'apprentissage, les contributions des projets auxquels j'ai participé sont rappelées dans les paragraphes suivants.

Réification de l'information et de la connaissance dans 3D-VOR

Dans le projet 3D-VOR, l'environnement sémantique décrit chaque objet du jeu (y compris le patient) par un ensemble de propriétés acceptant une valeur vraie ou fausse. La communication entre les joueurs (et idéalement avec les personnages non-joueurs également) constituait une fonctionnalité essentielle relativement aux objectifs de la formation (meilleure communication dans le bloc opératoire). De ce fait, la communication n'a pas été implémentée par un *chat* vocal ou textuel, comme c'est classiquement le cas dans les jeux (sérieux ou non) collaboratifs, mais par un mécanisme innovant de manipulation de l'information, cette dernière étant directement liée aux états des objets. Ainsi, chaque valeur d'un état d'un objet de l'environnement constitue en soi une information qui peut revêtir plusieurs formes contextuelles. Par exemple pour l'état d'anxiété du patient (`patient.anxious:True/False`) : « Le patient est anxieux. » (positif), « Le patient est calme. » (négatif) et « Quel est l'état d'anxiété du patient ? » (requête). Ces infor-

FIGURE 4.6 – Les informations connues d'un joueur sont regroupées dans un panneau «mémoire» à droite de la fenêtre de jeu. Les bulles d'information peuvent être collectées depuis les objets, les documents, ou reçues d'autres joueurs.



mations sont rendues tangibles dans l'environnement sous forme de «bulles» afin d'être manipulées par les apprenants à travers un certain nombre d'interactions. La figure 4.6 illustre une transmission d'information réalisée dans le prototype académique de 3D-VOR par glisser-déposer de la bulle correspondante depuis la «mémoire» du joueur jusqu'à un autre joueur.

Un ensemble de métaphores de communication ont ainsi été développées pour permettre aux apprenants de collecter des informations dans l'environnement et les documents, de les transmettre, et de prendre des décisions argumentées. Ces métaphores ont été décrites en détail dans [Panzoli et al.(2015a)]. La contribution de ce système, d'un point de vue pédagogique, réside dans la traçabilité de la communication. Contrairement à des échanges verbaux ou textuels, les échanges entre les joueurs, canalisés par le système de communication, n'échappent ni aux personnages non-joueurs ni aux algorithmes en charge de l'évaluation du joueur, qui peuvent analyser chaque décision prise par un apprenant en tenant compte de l'état de ses connaissances comme facteur explicatif du contexte. Du point de vue ergonomique, le système de communication a été présenté sous forme de démo à la communauté française d'IHM [Panzoli et al.(2015b)] puis validé expérimentalement par les utilisateurs finaux, à savoir des élèves en soins infirmiers, dans [Lelardeux et al.(2017)].

Interactions ergonomiques dans MecaTeam 3D

L'objectif du projet Meca 3D est de simplifier la réalisation de gestes techniques par un ensemble de métaphores dans le but d'accroître l'intuitivité d'un atelier virtuel pour la formation en génie mécanique. Les recherches conduites dans ce projet, et particulièrement dans la thèse de doctorat de Nicolas Muller, ont permis d'établir un ensemble de règles pratiques et applicables permettant d'atteindre un compromis entre deux objectifs *a priori* contradictoires :

- Les interactions proposées dans l'environnement de réalité virtuelle doivent être suffisamment simplifiées pour être assimilées rapidement par des utilisateurs qui n'ont aucune expérience des environnements de réalité virtuelle et qui peuvent rapidement se sentir désorientés voire malades dans un tel dispositif.
- Elles doivent également être suffisamment proches de la réalité que les compétences acquises dans l'environnement virtuel soit naturellement et instinctivement



(a) Métaphore de la main virtuelle

(b) Lancer de rayon dans un menu

FIGURE 4.7 – La métaphore de la main virtuelle (a) consiste à afficher une main à la position de chaque manette dans l'espace, en prenant également en compte son orientation et l'état de ses actionneurs (main fermée lorsque gâchette appuyée par exemple). Le lancer de rayon (b) est plus pertinent lorsqu'il s'agit de manipuler des menus.

transposables dans l'environnement réel de l'activité .

Les résultats de ce travail mettent en lumière la nécessité, dans le cadre d'un jeu d'apprentissage immersif, de s'affranchir de certaines règles ergonomiques lorsqu'il est nécessaire de privilégier ponctuellement les contraintes pédagogiques. Par exemple, la métaphore de la main virtuelle (figure 4.7a) est adoptée comme métaphore d'interaction principale dans le jeu, mais elle n'exclut pas le recours ponctuel à d'autres méthodes comme le changement contextuel d'outil en main (figure 4.8), le pointage par rayon pour les menus (figure 4.7b), ou encore la simplification elliptique (pour le changement de poste de travail). Ces propositions, ainsi que l'assistant virtuel (décrit dans la section 5.5) de Meca 3D ont été évaluées par des étudiants en génie mécanique selon un cadre d'utilité-utilisabilité-acceptabilité. Malgré le contexte spécifique du projet (manipulation de machines-outils) les interactions envisagées sont suffisamment génériques pour envisager une transposition à d'autres domaines mettant en jeu une formation technique. Les résultats ont été publiés dans [Muller et al.(2017)] et dans le manuscrit de la thèse de Nicolas Muller [Muller(2019)].

Réalisme du geste

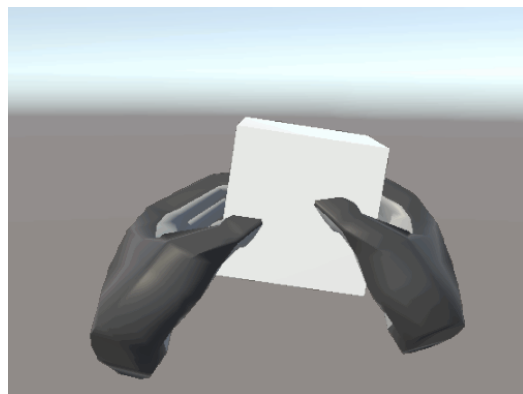
Même si les métaphores d'interactions constituent une abstraction simplificatrice souvent opportune, dans certains cas les objectifs pédagogiques peuvent contraindre l'utilisateur à interagir avec son environnement de la manière la plus réaliste possible, c'est à dire par exemple à manipuler des objets avec ses mains. C'est le cas typiquement dans certaines formations techniques où le geste technique fait partie intégrante de l'apprentissage.

En collaboration avec deux étudiants du Master AMINJ de l'INU Champollion, le travail publié dans [Panzoli et al.(2019)] a permis d'explorer une solution innovante consistant à utiliser de vrais objets à la fois comme contrôleurs de l'interaction, mais aussi comme vecteurs des sensations haptiques en retour de ces interactions. La figure 4.9 illustre le

FIGURE 4.8 – *Modifications contextuelles de la main virtuelle : dans l'image de gauche en bâton au contact d'un bouton (appui); dans celle de droite en clé Allen au contact d'une molette (rotation).*



(a) *Dispositif expérimental*



(b) *Vue dans le casque VR*

FIGURE 4.9 – *Grâce à l'utilisation d'une API de réalité augmentée, les interactions avec les objets virtuels sont rendues plus réalistes par l'association d'un objet réel de forme similaire.*

dispositif mis en place, intégrant deux API commerciales (Vuforia et Leap Motion Orion), et permettant de synchroniser en temps réel les représentations virtuelles des mains et d'un objet manipulé, de manière à rendre l'interaction la plus réaliste possible, en termes de liberté de manipulation et de retour haptique.

4.4 Bilan du chapitre

L'étape d'implémentation des interactions pédagogiques est celle où se concrétise enfin la mise en œuvre d'une activité scénarisée préalablement numérisée dans un environnement préalablement décrit. Les choix qui sont fait ici sont guidés par une notion de pertinence pédagogique, qui implique de chercher le niveau de détail le plus approprié pour à la fois rendre compte avec précision et fidélité du geste ou de la tâche, et permettre à

l'apprenant de l'utiliser et d'assimiler l'interaction sans se sentir inapte, désorienté, ou pire encore, malade. Au nom de la pertinence pédagogique, de nombreux raccourcis sont ainsi privilégiés, qu'on nomme métaphores pour rappeler que si le moyen est détourné, l'objectif en revanche n'est pas modifié mais au contraire souligné. Dans la pratique, toute interaction qui ne relève pas explicitement d'un objectif, directement ou indirectement, résiste rarement au passage du rasoir d'Occam et se voit écartée. Certes, les options de l'utilisateur dans l'EV3D sont souvent enrichies de nombreuses interactions ne participant pas directement à la tâche, mais celles-ci nourrissent toujours un objectif pédagogique comme l'inciter à l'erreur, lui proposer des distractions ou des fausses pistes, etc.

Enfin, malgré la souplesse offerte lors de l'implémentation par la grande variété des techniques d'interaction, les relations entre certains choix de mise en œuvre (tels que le type d'immersion ou les dispositifs du contrôle de l'application) et les choix généraux convenus en amont ne sont pas toujours aussi simples qu'on pourrait l'imaginer. Par exemple, le choix d'une immersion sensori-motrice authentique, avec un casque de réalité virtuelle, bien qu'elle soit parfaitement justifiée par les objectifs de la formation, rend plus complexe la collaboration entre plusieurs apprenants, et interdit pratiquement toute idée de déploiement à grande échelle de l'outil. Réciproquement, la nécessité de livrer un outil accessible à tous sans contraintes de matériel onéreux, d'expérience préalable avec le contrôle d'un jeu, ou de risque de maladie, restreint considérablement l'expressivité de représentation des interactions dans l'EV3D. Pour cette raison, la question des dispositifs envisagés est souvent celle qui se pose au démarrage d'un projet avant toutes les autres.

5 | Intégration de la dimension sociale de l'apprentissage

Interactions pédagogiques avec d'autres joueurs ou des personnages non joueurs

Dans ce chapitre, nous examinons de quelle manière la collaboration entre plusieurs joueurs et/ou la présence de personnages non joueurs peuvent apporter une dimension sociale à un jeu d'apprentissage immersif. Dans l'environnement virtuel, le joueur est rarement seul. D'autres acteurs sont amenés à partager son espace, et ce pour deux raisons. Premièrement, et principalement, les activités professionnelles ciblées par les jeux d'apprentissage immersifs sont souvent techniques et intègrent de ce fait une dimension collaborative, ou a minima la présence active d'autres acteurs dans l'environnement. Deuxièmement, un environnement vide de toute présence «humaine» nuit à l'immersion du joueur, sauf lorsque le contexte s'y prête (maintenance dans un endroit exigü par exemple). Des techniques ont ainsi été élaborées pour soit réunir plusieurs joueurs dans un environnement commun, soit peupler l'environnement avec des personnages autonomes, le premier n'excluant pas le second.

Sommaire du chapitre

5.1	Collaboration et coopération	68
5.2	Les personnages non joueurs	68
5.2.1	Foules virtuelles	69
5.2.2	Co-équipiers	69
5.2.3	Tuteurs pédagogiques	70
5.3	Approches centralisée et décentralisée	70
5.4	Communication verbale et non-verbale	73
5.5	Contributions	75
5.6	Bilan du chapitre	77

5.1 Collaboration et coopération

Quelle est la différence entre coopérer et collaborer ? Plusieurs acteurs coopèrent dans un environnement virtuel lorsqu'ils mènent leur activité sans se perturber les uns les autres, et qu'ils accèdent aux ressources partagées de manière non conflictuelle. Plusieurs acteurs collaborent lorsqu'ils unissent leurs forces et leurs compétences pour la réalisation d'un objectif commun.

On peut avancer que la coopération est avant tout une problématique technique, dont les réponses sont apportées par la manière de concevoir l'environnement. En outre, l'existence d'un environnement sémantique unique et centralisé, tel que discuté dans le chapitre 3, est un moyen efficace d'aborder le problème. Des bibliothèques pour les moteurs de jeux courants, comme par exemple *Photon Unity Networking*¹⁵, prennent en charge la synchronisation sur plusieurs postes d'un environnement partagé. La collaboration, au contraire, relève des moyens ergonomiques mis à la disposition de chaque joueur pour interagir directement avec les autres, mais également pour effectuer des interactions de manière concertée. [Domingues(2010)], ou plus récemment [Sra et al.(2018)], traitent en détail cette problématique en VR selon l'angle de l'ergonomie des interfaces 3D. Les tâches assignées aux apprenants dans une formation peuvent faire intervenir la coopération comme élément structurel de cette formation : de nombreux métiers techniques s'inscrivent dans le cadre d'un travail d'équipe ou d'une hiérarchie professionnelle. La restitution fidèle du contexte de l'activité se doit en conséquence d'inclure les interactions avec autrui, qu'il s'agisse d'autres joueurs humains ou de personnages non joueurs (cf. section 5.2). La collaboration peut également être l'objectif premier de la formation, la tâche assignée n'étant dans ce cas guère plus qu'un prétexte à l'apprentissage des compétences interpersonnelles. L'environnement virtuel partagé peut alors s'imposer comme le terrain de jeu idéal pour apprendre la coopération. Pour [Rocha et al.(2008)], il y a plusieurs façons d'inciter ou d'imposer la coopération dans un jeu : donner un objectif commun, donner à chacun des capacités ou des pouvoirs complémentaires, restreindre l'utilisation de certains objets à certains rôles, limiter la quantité des ressources, etc. Cette liste de recommandations a été enrichie plus tard par [Seif El-Nasr et al.(2010)].

La présence de plusieurs rôles dans un même environnement rend utile et souvent nécessaire la possibilité d'en substituer certains à des personnages non joueurs.

5.2 Les personnages non joueurs

On définit un personnage non joueur (PNJ) comme un acteur (le plus souvent humanoïde) dans l'environnement de formation qui n'est pas contrôlé par un joueur humain ou par le formateur. L'avatar, qui représente un joueur en vue à la 3^{ème} personne, n'est pas considéré comme un PNJ, malgré qu'il puisse être autonome ponctuellement, par exemple pour se déplacer de manière automatique à l'endroit pointé par l'utilisateur. Le PNJ se caractérise par une autonomie totale vis à vis du joueur humain, jusque dans ses interac-

15. <https://www.photonengine.com/pun>

tions et ses décisions. Selon le rôle qu'on lui accorde, il est possible d'ajuster la crédibilité de son comportement et de son intégration dans l'environnement : au plus simple, sa seule présence peut renforcer le réalisme d'une scène. Au plus complexe, son rôle peut devenir déterminant dans la transmission des savoirs, en assumant le rôle par exemple d'un tuteur pédagogique virtuel, programmé pour remplacer ou seconder le formateur humain. Pour assumer une telle variété de rôles, on trouve un continuum de techniques d'animation comportementale des agents virtuels, de la simulation d'une foule virtuelle aux agents conversationnels animés.

5.2.1 Foules virtuelles

L'utilisation d'une foule de personnages dans un environnement immersif peut nourrir plusieurs objectifs. Dans les applications d'héritage culturel [Vosinakis(2017)], ils mettent en valeur la reconstitution d'un lieu ou d'un événement en restituant avec exactitude des costumes, des pratiques religieuses ou sociales, etc. En outre, en rendant l'environnement plus «vivant», ils renforcent la présence du joueur dans celui-ci et suscitent potentiellement un meilleur impact du jeu. Des comportements plus adaptatifs, en réponse aux décisions du joueur ou à l'évolution de la situation, donnent à une foule de PNJ un pouvoir pédagogique en simulant les réactions du public lors d'un entraînement d'évacuation d'un bâtiment [Xi & Smith(2014)] ou bien à l'échelle d'une ville entière pour toutes sortes d'expérimentations comme le projet Terra Dynamica [Reynaud & Corruble(2013)].

5.2.2 Co-équipiers

L'augmentation de leur autonomie et de leurs capacités cognitives confère aux agents la possibilité de participer plus activement à l'activité d'apprentissage. Dans 3D-VOR [Lelardeux et al.(2016)], les personnages virtuels ont pour mission d'assumer des rôles présentant un intérêt pédagogique moindre pour les joueurs humains dans le bloc opératoire virtuel, ou bien de remplacer des joueurs manquants. Ils suivent l'activité programmée (procédure nominale) du rôle qu'ils occupent, et adaptent leur comportement pour tenter de ramener une situation adverse dans le chemin nominal du scénario, lorsque les joueurs sont tombés dans un des pièges du scénario. Une approche similaire est proposée dans le projet SécuRéVi, dans un contexte de sécurité industrielle, où les agents (sapeurs-pompiers) sont programmés pour suivre une procédure de manière totalement autonome. Le joueur peut prendre le contrôle de n'importe lequel d'entre eux et utiliser l'environnement (entre autres) comme d'un «bac à sable» pour expérimenter et comprendre les causes et les effets qui régissent l'évolution de l'incendie [Buche et al.(2006)]. Dans le projet V3S, les PNJ sont au contraire sources d'erreurs, car ils ont pour rôle de montrer au joueur que l'erreur et l'écart à la procédure est un comportement humain non exceptionnel, mais résultant de multiples facteurs comme le stress et la fatigue [Edward et al.(2008)]. Enfin, les agents virtuels du projet GVT [Gerbaud et al.(2007)] possèdent des profils pédagogiques et répondent aux situations de collaboration de manière moins stéréotypée qu'une scénarisation rigide.

5.2.3 Tuteurs pédagogiques

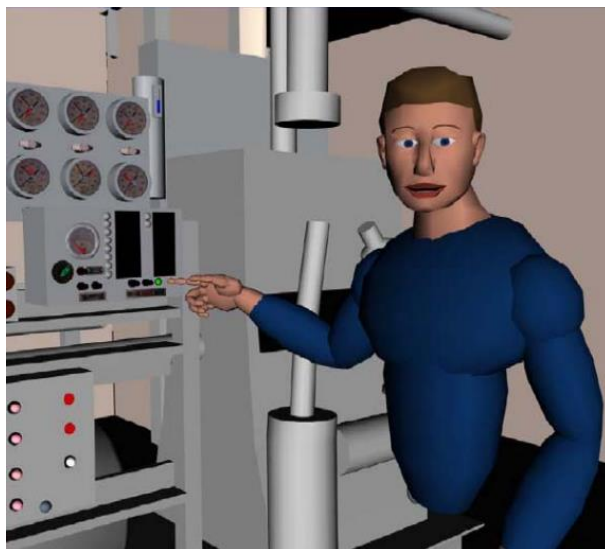


FIGURE 5.1 – Une illustration de STEVE, un tuteur pédagogique virtuel capable d'assister l'utilisateur dans la phase d'apprentissage en expliquant et en montrant.

Au niveau le plus complexe des capacités cognitives d'un PNJ, se trouvent les agents pédagogiques, qui ont pour particularité d'entretenir des relations directes avec le ou les joueurs humains : ils sont capables de converser avec le joueur, et même de montrer des émotions (lire un état de l'art récent dans [Pelachaud et al.(2015)]) pour susciter des réponses plus authentiques [de Melo et al.(2012)], pour établir un lien affectif par exemple dans les jeux thérapeutiques [Hudlicka(2016)], ou bien encore pour renforcer leur capacité de transmission du message pédagogique [Liew et al.(2017)]¹⁶. Les tuteurs pédagogiques, assurent des rôles pédagogiques en donnant la réplique au joueur, par exemple un client virtuel dans un jeu pour l'apprentissage de la vente directe, ou en assumant le rôle du formateur dans l'environnement, comme STEVE (voir figure 5.1) de [Rickel & Johnson(1999)] pour ne citer que le plus célèbre. Dans les deux cas, la scénarisation repose essentiellement sur les interactions entre le joueur et le tuteur pédagogique. Ce rôle n'est toutefois pas limitatif et l'agent peut tout à fait combiner un rôle actif et coopératif dans l'exécution de la tâche avec des interactions sociales en direction des joueurs, comme dans les agents du projet VICTEAMS [Lourdeaux et al.(2019)], ou dans l'environnement *Crystal Island* [Lester et al.(2011)]. De tels agents sont alors capables d'exploiter aussi bien les modèles numériques et les ontologies développés durant la phase de numérisation des connaissances (cf. chapitre 2) que l'environnement informé mis en place pour les interactions du joueur (cf. chapitre 3) [Taoum et al.(2016)].

5.3 Approches centralisée et décentralisée

Bien qu'il existe de nombreuses techniques, on discerne principalement deux approches pour animer ou simuler le comportement des PNJ. Elles mettent en œuvre deux visions

16. [Yannakakis & Paiva(2014)] proposent un état de l'art détaillé concernant le rôle de l'émotion en général dans les jeux.



FIGURE 5.2 – Dans le jeu “Façade” de Andrew Stern and Michael Mateas, le scénario est intégralement mis en œuvre à travers les interactions entre le joueur (1^{ère} personne) et les 2 personnages Grace et Trip. Son déroulement n’est pas fixé à l’avance mais dépend des choix du joueur. Cependant, l’intensité dramatique est à tout moment contrôlée par un algorithme.

différentes du contrôle. Un contrôle centralisé et synchronisé de tous les agents, qui s’apparente métaphoriquement à un spectacle de marionnettes ; et un contrôle distribué qui accorde à chaque agent un certain degré d’autonomie dans ses actions et ses décisions. Quelle que soit l’approche, des algorithmes de l’IA sont au cœur des techniques utilisées. Cependant, ces algorithmes ne sont pas utilisés ici pour trouver des solutions optimales mais avec l’objectif de donner une illusion d’intelligence humaine qui soit plausible pour les observateurs humains (les joueurs apprenants) et cohérente vis à vis de la réalité simulée.

Planification et *Interactive storytelling*

L’approche historique du contrôle de PNJ consiste à laisser un algorithme omniscient superviser le comportement des personnages. Elle s’inspire des premiers algorithmes de l’IA classiquement utilisés dans des jeux pour simuler le rôle de l’adversaire, comme dans le jeu d’échecs. À chaque instant, l’algorithme possède une connaissance globale de la situation et des possibilités d’évolution (i.e. les actions réalisables des personnages qu’il dirige). Il simule des plans d’action possibles et met en œuvre celui qu’il juge le plus satisfaisant, selon une évaluation qui prend en compte les objectifs assignés à chaque personnage (e.g. assister le joueur, ou le perturber). Durant le déroulement de la séquence, un plan ne peut pratiquement jamais être mis en œuvre dans sa totalité (sauf cas idéal) du fait des perturbations causées par les joueurs qui n’en ont pas connaissance et qui ne jouent pas de manière optimale. On parle donc de planification dynamique lorsque le plan doit sans cesse être réévalué par l’algorithme. Dans le projet 3D-VOR, [Sanselone et al.(2014a)] mettent en place un algorithme de type Monte-Carlo Tree Search (voir section 5.5) permettant de superviser les actions de plusieurs PNJ opérant au milieu des joueurs dans l’EV3D. L’algorithme maintient une vision des futurs possibles à partir de l’état courant, et tend à orienter le déroulement de la séquence vers un des états finaux souhaitables prédéterminés lors de la scénarisation. Pour cela, il fait intervenir les PNJ comme autant de pièces sur le plateau d’un jeu d’échec, hormis qu’il ne joue pas pour vaincre les joueurs mais au contraire dans leur intérêt.

La planification dynamique est une technique couramment employée par l’approche *Interactive Storytelling* [Crawford(2012)], qui représente une autre façon de penser la scénarisation d’une expérience ludique ou pédagogique dans laquelle le scénario est déroulé

(ou plutôt l'histoire racontée) par les interactions avec les personnages. La problématique, résumée par [Cavazza et al.(2001)], consiste à développer des systèmes flexibles basés sur les personnages mais reposant tout de même sur des formalismes narratifs établis préalablement. Le jeu *Façade* (illustré dans la figure 5.2) représente à ce jour l'exemple le plus abouti de cette approche. En outre, il met en œuvre un algorithme de gestion dramatique [Mateas & Stern(2002)] qui permet, en plus de la gestion de la narration vers les dénouements prévus, de maintenir l'intensité dramatique et donc l'intérêt du joueur.

La planification dynamique possède l'avantage de l'extensibilité car on peut planifier le comportement d'un agent comme d'une équipe de dix. Cependant, les algorithmes employés ont été conçus pour l'optimalité. Or, l'humain fait des erreurs, et intégrer ce paramètre n'est pas trivial. De ce fait, en réaction à l'approche centralisée et holistique de la planification, les approches centrées-agent ont pour ambition de donner plus d'autonomie aux PNJ.

Approches centrées agent

Dans cette approche, un agent possède sa propre représentation locale de la situation et il prend des décisions de manière autonome, sans coordination préalable avec les autres. Pour accroître le réalisme de son comportement et de ses décisions, l'agent peut être doté d'une vision synthétique (donc partielle et faillible) de son environnement. Dans les jeux d'apprentissage immersifs, et les jeux vidéo en général, c'est rarement le cas : l'agent perçoit l'environnement informé à travers les propriétés symboliques de celui-ci [Farenc et al.(1999)]. La décision, au centre du processus de sélection de l'action, peut-être instantancée de différentes manières, en fonction des propriétés désirées. L'application locale au niveau de l'agent d'un algorithme de planification (tel que décrit dans la section précédente) est une approche courante. L'idée générale consiste à transposer l'algorithme de recherche d'un chemin dans l'environnement (i.e. algorithme A* déjà courant dans les jeux vidéos) à la recherche d'un «chemin» vers un objectif. Pour cela, une phase de modélisation cognitive vise à doter l'agent de représentations internes de son environnement lui permettant de mettre en œuvre des raisonnements symboliques. Chaque agent est alors muni d'un ensemble de buts qu'il va chercher à satisfaire en planifiant des séquences d'action (déplacements, interactions, etc.) dans l'environnement [Shao & Terzopoulos(2007)]. L'agent, affranchi de scripts trop dirigistes, s'adapte dynamiquement à des changements dans l'environnement (semblable à l'apparition d'obstacles) et se montre opportuniste si un objectif apparaît à portée durant la réalisation de son plan courant. L'approche générale décrite ci-dessus est celle que l'on retrouve au cœur des populaires architectures GOAP (*Goal Oriented Action Planning* [Orkin(2003)]) et SOAR [Laird et al.(1987)]. Il en existe de nombreuses autres implémentations¹⁷.

Une des limitations de l'approche planification est le travail manuel nécessaire pour concevoir les éléments qui constitueront les briques sur lesquelles opère l'algorithme : les primitives des actions possibles d'une part, et les interactions exposées par les ob-

17. Le paradigme BDI (*belief-desire-intention*) désigne la classe des architectures qui mettent en œuvre une délibération à partir d'un modèle cognitif de l'environnement et de buts. Il est très courant dans les modèles de simulation sociale [Adam & Gaudou(2016)].

jets (par exemple sous la forme de *smart objects* [Kallmann & Thalmann(1999)]) d'autre part. Pour y remédier, certaines architectures introduisent des mécanismes d'apprentissage pour alléger le travail du concepteur et apporter plus d'adaptativité aux agents. [Sanchez et al.(2004)] dotent leurs agents de capacités d'apprentissage en ligne leur permettant de découvrir par eux-même de nouvelles interactions. Les agents se montrent ainsi capables de faire preuve d'imagination dans la réalisation de leurs buts, malheureusement parfois au détriment de certaines conventions sociales. D'autres approches envisagent l'apprentissage du comportement de l'agent dans sa totalité : par imitation d'un opérateur humain dans [Borovikov et al.(2019)], ou bien plus généralement par l'agrégation des comportements de milliers de joueurs dans [Orkin & Roy(2008)].

Approche hybride : les systèmes multi-agents

L'approche multi-agents (MAS), qu'on retrouve dans la gestion des PNJ de nombreux jeux d'apprentissage immersifs, s'impose comme une approche hybride où il est possible d'allier le contrôle narratif offert par la capacité de coordination de plusieurs entités avec le réalisme propre au principe d'autonomie comportementale. Les bénéfices ne s'arrêtent pas là. Dans MASVERP [Edward et al.(2008)], les plans mis en œuvre par les PNJ sont impactés par des paramètres internes aux agents comme le stress ou la fatigue, et donnent lieu à des comportements variables d'une session de jeu à l'autre. Dans MASCARET [Buche et al.(2004)], le système multi-agent qui régit le comportement des PNJ est étendu à tous les objets de la simulation, ce qui permet d'inclure les phénomènes naturels (physiques, météorologiques, etc.) dans la dynamique de l'environnement, outre les interactions des joueurs et des PNJ. Dans SIMFOR [Tranvouez et al.(2014)], le MAS intègre la possibilité de conjuguer le comportement des PNJ dans l'environnement et la communication verbale (simulée par un système textuel) avec les joueurs humains.

5.4 Communication verbale et non-verbale

Dans un jeu d'apprentissage immersif, il est une forme d'interaction sociale qui revêt une importance cruciale, c'est la communication verbale.

C'est particulièrement le cas dans des jeux de formation à la vente ou aux entretiens professionnels, aux compétences sociales en général [Lane & Wray(2012)] ou bien aux compétences douces (*soft skills*) comme le *leadership* [Trimmer(2010)]. Cependant, dans de nombreux jeux d'apprentissage immersifs, la communication ne constitue pas nécessairement le cœur des objectifs, mais plutôt un moyen de concertation ou de régulation de l'activité professionnelle collaborative qu'il est fondamental de prendre en compte comme facteur explicatif des actions et des décisions prises. En effet, dans un contexte de formation, la mise en œuvre d'un plan ou une prise de décision sont certes des événements mesurables, mais souvent moins essentiels que les échanges qui les précèdent. On distinguera la communication entre un joueur humain et ses pairs de celle avec les agents virtuels.

Échanges entre les joueurs

La communication entre les joueurs humains ne représente pas un défi technique insurmontable. Dans les moteurs de jeux récents, il est plutôt facile d'intégrer un *chat* vocal permettant aux joueurs d'échanger verbalement. Cependant, un inconvénient majeur ternit cette apparente bonne nouvelle : une telle communication échappe à la compréhension du programme et juggle toute tentative de systématisation de l'évaluation ou d'intégration des personnages non-joueurs dans les dialogues. En outre, la substitution du vocal par le textuel apporte peu, car ce ne sont pas les mots qui échappent au système, mais leur sens. [Lelardeux et al.(2017)] tentent de remédier au problème en proposant dans 3D-VOR un système de communication «canalisé» basé sur la manipulation d'informations rendues tangibles dans l'EV3D sous formes d'étiquettes, compréhensibles à la fois par les joueurs humains et les algorithmes du jeu (système de tuteurage, PNJ, etc). Dans ce paradigme, la communication et la prise de décision sont considérées comme des manipulations d'information, et rendues possibles par des métaphores d'interaction élaborées à dessein et utilisables grâce à des manipulations simples à la souris. Dans le projet CORVETTE, où un soin particulier est apporté à la richesse des interactions entre le joueur et les personnages virtuels, [Lopez et al.(2014)] proposent la notion de *Shell* comme une extension de la représentation graphique d'un personnage qui inclut une base de connaissances permettant aux coéquipiers virtuels de collaborer mais également de fournir au joueur des informations sur la procédure ou l'état courant de l'environnement. La transmission d'informations déclaratives s'effectue en langage naturel, dotant ainsi les coéquipiers de facultés traditionnellement réservées aux agents conversationnels animés.

Agents conversationnels animés

La communication entre un joueur et un agent virtuel ne souffre pas d'un manque de traçabilité, mais sa mise en œuvre en revanche constitue souvent un défi technique. Collaborer avec des coéquipiers virtuels en donnant des ordres simples et stéréotypés est une façon d'en contourner la difficulté, lorsque les objectifs en terme de communication le permettent. Ces interactions peuvent être associées à des mots-clés reconnus par un système de reconnaissance vocale, ou bien directement intégrés sous forme d'affordances graphiques, à la manière des interactions sur les objets de l'EV3D. En retour, le PNJ peut parler aux joueurs en utilisant lui-même des phrases pré-enregistrées, ou bien au moyen d'un système de synthèse vocale (TTS pour *Text-To-Speech*) qui offre l'avantage de pouvoir adapter en temps réel les répliques du personnage [Engström & Östblad(2018)].

L'intégration d'agents conversationnels animés (ACA), des personnages non-joueurs capables d'entretenir des conversations avec les joueurs, nécessite un apport technique considérable au niveau de la compréhension. L'analyse de la parole du joueur¹⁸ s'effectue à travers plusieurs couches de niveau de compréhension et de complexité croissante : analyses syntaxique, linguistique et sémantique. C'est cette dernière couche qui donne du sens aux paroles captées et permet la production de réponses pertinentes. Pour cela, l'ACA embarque une représentation du domaine permettant de raisonner. Les arbres de décisions ou de dialogues constituent une première approche très utilisée. L'utilisation

18. Le champ disciplinaire concerné s'appelle Traitement Automatique du Langage Naturel (NLP).

d'un formalisme spécifique comme AIML [Wallace(2003)] permet d'étendre les capacités conversationnelles de l'ACA. Enfin, les approches les plus récentes se penchent sur l'apprentissage automatique à partir d'une annotation préalable d'un corpus de messages [Tellols et al.(2020)]. Outre leur capacité à comprendre, raisonner et dialoguer de manière intelligente, les ACA embarquent généralement une couche supplémentaire appelée socio-affective [Ochs et al.(2014)]. Cette dernière leur octroie la capacité de percevoir et prendre en compte les émotions de leur interlocuteur, ou bien d'afficher eux-même une communication non verbale naturelle (voir [Chollet(2015)] pour un état de l'art récent).

5.5 Contributions

Les contributions de mes recherches ou des projets auxquels j'ai participé concernant l'animation de personnages virtuels sont synthétisés dans les paragraphes suivants.

Réseaux sociaux et génération de contenu dans RomaNova

Dans le projet Roma Nova, une foule de romains circule dans une reconstruction 3D d'une partie de la ville (le Forum, tel qu'il existait en 340 avant J.C.) et se tient prêt à interagir avec le joueur pour transmettre des informations relatives à la vie des romains dans l'antiquité. Ce projet s'inspire de travaux sur l'animation des foules, et notamment le projet Pompeii [Maïm et al.(2007)] de l'EPFL (Lausanne, Suisse) qui vise à peupler virtuellement la ville antique de Pompéi pour offrir au visiteur une expérience saisissante. La problématique que j'ai souhaité aborder avec ce projet est celle de la génération des contenus pédagogiquement pertinents. Grâce à un environnement informé (chaque lieu dans le forum contient des informations sémantiques relatives à sa fonction), chaque personnage compose librement son parcours pour remplir des objectifs qui lui ont été assignés lors de son entrée dans le monde virtuel (figure 5.3 à gauche). Lorsqu'il les a complétés, il quitte le forum et est remplacé par un nouveau. En plus d'objectifs, chaque personnage se voit attribué un profil social : un emploi, un passé, une situation de citoyenneté, un réseau d'acquitance, etc. Il utilise ces données pour interagir avec les autres personnages ou avec l'apprenant, avec lequel il peut échanger des informations lors de conversations stéréotypées générées à partir de son profil social (figure 5.3 à droite).

Une publication de synthèse des résultats de ce projet [Panzoli et al.(2010b)] démontre la faisabilité d'un environnement ouvert dédié à l'apprentissage dans lequel les contenus pédagogiques pourraient être massivement délégués à des algorithmes de génération procédurale. L'article met ainsi l'accent sur la nécessité d'un cadre conceptuel pour les interactions pédagogiques, s'appuyant sur des cadres techniques connus comme les niveaux de détails [Luebke et al.(2002)] ou les niveaux de simulation [Pettré et al.(2006)].

Le comportement collectif dans 3D-VOR

Dans le projet 3D-VOR, certains rôles peuvent être assumés par des personnages non-joueurs, animés par un algorithme d'IA de type centralisé permettant de planifier et de synchroniser leur comportement à partir des données indiquées dans le scénario et la représentation de l'activité. L'implémentation de l'algorithme de type *Monte Carlo Tree*



FIGURE 5.3 – Les romains qui peuplent le forum virtuel de Roma Nova sont caractérisés par un profil social : ils peuvent interpellier des connaissances (gauche) ou utiliser ces informations pour converser avec le joueur (droite).

Search (MCTS) a été réalisée dans le cadre de la thèse de doctorat de Maxime Sanselone, encadré par Stéphane Sanchez, Cédric Sanza et moi-même. Ma contribution réside dans l'adaptation de l'environnement sémantique du jeu à l'algorithme. Pour cela, nous avons proposé une modélisation simplifiée des états du monde autorisant la représentation des futurs possibles par les sommets d'un graphe dont les arcs traduisent les transitions (i.e. les interactions exécutables par un joueur ou un PNJ). Le graphe d'exploration des états présenté dans la figure 5.5, agrège les différents chemins empruntés au cours de nombreuses simulations. Il révèle la capacité de l'algorithme à produire des solutions variées d'une exécution à l'autre, et à s'adapter dynamiquement aux perturbations de l'activité. Les résultats de ce travail ont été publiés dans [Sanselone et al.(2014a)] et [Sanselone et al.(2014b)].

Tuteurs virtuels dans Meca 3D

Dans le travail de thèse de Nicolas Muller, une assistance virtuelle est fournie par un personnage virtuel ayant l'apparence d'un robot stylisé, où seules les mains et la tête sont représentées : les mains montrent les gestes et la tête indique où l'attention doit être portée (cf. figure 5.4). La représentation du corps (postures, placement, etc.) a été jugée non pertinente pédagogiquement dans les tâches démontrées.

Les modalités proposées pour l'interaction avec le tuteur virtuel sont naturelles, et intuitives ou calquées sur des postures déjà connues par l'apprenant depuis l'école. Le tuteur est présent en retrait tout au long de la séquence de jeu. Il se manifeste lorsque l'apprenant regarde dans sa direction pour signifier sa disponibilité, mais intervient uniquement lorsque celui-ci lève la main (i.e. la manette VR). Le tuteur se déplace alors auprès de l'apprenant. Le premier niveau d'intervention consiste à rappeler verbalement (sous formes de bulles de texte dans l'EV3D) l'objectif en cours et les étapes de la tâche à réaliser. Si ce n'est pas suffisant, le deuxième niveau d'intervention consiste à montrer *in situ* la tâche à réaliser. Il est déclenché lorsque l'apprenant se met en retrait et fait place



FIGURE 5.4 – *Démonstration d’une manipulation par l’assistant virtuel du point de vue de la scène (à gauche) et de l’apprenant (à droite).*

devant la machine. Une séquence pré-enregistrée (capturée directement par le concepteur) est ainsi jouée dans l’EV3D. L’évaluation du tuteur virtuel est un travail en cours.

5.6 Bilan du chapitre

Qu’il s’agisse de peupler l’environnement avec des PNJ ou de rendre possible la collaboration de plusieurs joueurs humains, l’existence d’un environnement sémantique unique et commun est un pré-requis indispensable pour maintenir la cohérence du monde. Le concept de *Fully Equal Partners* [Thomas & Vlacic(2011)], sorte de ré-interprétation du test de Turing dans un jeu ou dans un EV3D, représente un idéal de conception où les PNJ seraient en mesure d’interagir avec les apprenants humains de manière à créer d’authentiques situations d’échange et d’apprentissage (pourquoi pas mutuel?). Hormis les nombreux verrous technologiques qui se dressent sur le chemin de l’interaction fluide et naturelle entre l’homme et la machine, la compréhension du monde demeure l’écueil le plus important auquel se heurtent encore les algorithmes de contrôle, qu’ils soient centralisés ou non. Outre la compréhension du monde, le jeu d’apprentissage immersif ajoute celles de l’activité et de la tâche. Les architectures utilisées pour le contrôle des PNJ doivent ainsi savoir interagir avec les objets du monde et les joueurs, et de surcroît dans le respect de la logique et des règles métier qui ont été décrites par les concepteurs.

Dans la dernière partie de notre projet de recherche, à partir de la page 97, nous évoquons la piste de l’apprentissage automatique pour contourner le problème de la compréhension et de l’interprétation par les PNJ. Les travaux novateurs de [Orkin & Roy(2008)] ont montré de quelle manière des PNJ pouvaient apprendre, de manière autonome, à se comporter auprès de joueurs humains à partir de l’assimilation des traces d’activité de centaines de situations différentes. L’expérience ainsi acquise par le PNJ au cours de multiples interactions répétées lui confère progressivement la faculté de généraliser un

6 | Collecte et analyse des traces utilisateur

Observer et analyser l'interaction pédagogique

Les interactions qui ont été conçues et implantées dans le jeu immersif d'apprentissage sont destinées à être mises en œuvre par chaque joueur au cours de son exploration personnelle du scénario. Cette activité laisse des traces (numériques) qui sont utiles au concepteur pour collecter des informations relatives à l'usage de son outil, et qu'il va pouvoir exploiter, en cours de jeu ou a posteriori, pour l'évaluation et l'accompagnement du joueur, ou bien pour s'assurer de la qualité de l'outil. Ce sont ces aspects que nous explorons dans ce chapitre.

Sommaire du chapitre

6.1	Traces utilisateur	79
6.1.1	Indicateurs et métriques	80
6.1.2	Collecte des données	81
6.2	Évaluation de l'apprenant	81
6.3	Évaluation du jeu	84
6.4	Contributions	85
6.5	Bilan du chapitre	88

6.1 Traces utilisateur

Les traces utilisateur sont toutes les données numériques quantitatives (i.e. des variables) et endogènes qui peuvent être collectées à partir de l'activité observable du joueur dans le jeu (i.e. les actions et interactions). On les distingue des données exogènes quantitatives comme celles issues d'un système oculométrique ou d'une interface neuronale directe [Liarokapis et al.(2014)] ou d'un questionnaire. On les distingue également des données qualitatives extraites d'entretiens ou d'enregistrements vidéos. Pour les développeurs de jeux vidéo, les traces cumulées de nombreux joueurs (on parle de *game telemetry*) informent sur la qualité du jeu et permettent de cibler les améliorations [Zoeller(2013)]. Pour le concepteur pédagogique, les traces individuelles d'un joueur (on parle de *information trails*) permettent de rendre compte de sa progression et éventuellement d'adapter la

difficulté ou la narration à son niveau [Loh(2012)]. Dans les deux cas, la discipline récente des *Serious Games Analytics* (qui dérive de l'*Educational Data Mining*, EDM) explore de quelle manière les traces collectées dans le jeu, qui ne sont que des données brutes, peuvent être transformées en informations pertinentes pour l'évaluation de l'apprenant ou du jeu.

6.1.1 Indicateurs et métriques

Un indicateur permet d'établir une assertion, d'ordre pédagogique lorsqu'elle concerne l'apprenant (e.g. attester d'une expertise), ou bien plus générale si elle concerne le jeu (e.g. adéquation du niveau de difficulté). Par exemple, dans une tâche donnée, un indicateur de l'expertise de l'apprenant peut consister à mesurer la vitesse d'exécution, l'ordre des opérations, l'évitement d'une erreur ou sa récupération, etc. Autre exemple, un indicateur de difficulté d'une activité peut consister à examiner le nombre d'apprenants qui restent bloqués, qui font appel à l'aide intégrée, etc. Pour mesurer un indicateur, il est nécessaire de concevoir des métriques, c'est à dire des observables quantifiables auxquels les traces vont permettre de donner une valeur : temps moyen entre ceci et cela, nombre de fois où le joueur a effectué cette action, non déclenchement de telle alarme, etc.

Il n'existe pas à proprement parler de métriques spécifiquement prêtes à l'emploi pour les jeux sérieux (immersifs ou non), et celles qui sont utilisées s'inspirent des jeux (*game analytics*) ou de l'éducation (*learning analytics*), ce que déplorent [Loh et al.(2015)]. Les métriques de jeu ont pour objectif de traduire l'amusement du joueur ou les problèmes de *gameplay* : principalement, elles s'intéressent à la performance pure (temps de jeu, ennemis tués, pièces ramassées, etc.) ou la difficulté (zones inaccessibles, obstacles). Or, [Westera et al.(2014)] remarquent qu'une performance élevée n'est pas synonyme d'apprentissage, par exemple si elle a été acquise au prix d'une répétition irréfléchie d'essais/erreurs, alors que l'apprentissage est un processus demandant de l'attention, de l'intérêt, du temps et de la réflexivité. D'autres métriques par contre peuvent présenter un intérêt supérieur comme la stratégie employée ou le profil de joueur.

Les métriques d'apprentissage (voir [Papamitsiou & Economides(2014)] pour une revue récente) ont pour vocation de nourrir un modèle de l'apprenant en analysant les ressources visitées, les scores obtenus à des questionnaires d'auto-évaluation ou d'autres types d'activité riches, et en prenant en compte éventuellement les préférences et le profil socio-démographique. Le modèle de l'apprenant est souvent conçu de manière empirique, à partir de la littérature, mais enrichi par les traces utilisateurs collectées au niveau de la population, par un procédé de classification ou d'analyse statistique.

En ce qui concerne spécifiquement les jeux d'apprentissage immersifs, on trouve malgré tout dans la littérature des tentatives de mesure objective de propriétés attendues dans l'EV3D. Par exemple, [Ermi & Mäyrä(2005)] tentent de mesurer le degré d'immersion. Dans [Bouvier et al.(2013b)], les auteurs s'intéressent à l'engagement dans le jeu. Pour cela, ils s'appuient sur un cadre théorique regroupant la théorie de l'autodétermination [Deci & Ryan(1980)] et la théorie de l'activité. [Fernández-Gallego et al.(2013)] proposent un cadre conceptuel spécifique pour les EV3D basé sur la découverte de *learning flows*, un concept qui insiste sur la nature continue du processus d'apprentissage, par

opposition à un événement ponctuel. Enfin, dans [Seif El-Nasr et al.(2010)], les auteurs proposent un ensemble de métriques permettant de mesurer la coopération selon plusieurs critères (enthousiasme, planification, assistance et attente), qu'ils évaluent à partir de vidéos de sessions de jeu.

6.1.2 Collecte des données

La collecte des données s'effectue nécessairement en temps réel. Les données peuvent être analysées et exploitées en ligne, ou bien stockées dans un fichier de *log* ou sur un serveur pour analyse différée. Elle concerne potentiellement tout ce qui est observable : les actions (de manière horodatée) et les décisions, mais aussi les préférences, les succès et les échecs, les erreurs.

La question de la granularité est donc importante. Naïvement, collecter indistinctement toutes les interactions brutes de l'apprenant semble peu judicieux, car on devrait stocker un volume conséquent de données peu significantes. On préférera poser dans l'environnement des « dalles invisibles » qui s'activent lorsqu'elles sont foulées (à proprement parler, ou bien figurativement) par l'avatar, ou marquer certains nœuds du scénario ou certaines actions de l'activité pour discrétiser le suivi de la progression du joueur. Si elle réduit considérablement les données à collecter, cette approche nécessite de connaître dès le stade de la conception les points de contrôle pertinents. Elle va donc idéalement de pair avec une méthodologie de conception fondée sur la preuve [Mislevy et al.(2003)] (ECD, évoquée dans la section 2.3.2). Dans un EV3D, les traces des déplacements du joueur constituent également une source volumineuse de données. Cependant, [Drachen & Canossa(2011)] considèrent les comportements de navigation spatiale du joueur dans l'environnement présentent un intérêt suffisant pour en proposer une analyse ou au moins une représentation visuelle (cf. exemple illustré dans la section 6.4). Ils établissent un parallèle pertinent avec l'éclairage qu'apporte le suivi des clients dans les sites de e-commerce [Cadez et al.(2000)].

Une deuxième problématique de la collecte concerne la capacité à tracer ce qui ne relève pas a priori d'une interaction explicite et intentionnelle, comme par exemple ce que l'apprenant a pu voir dans l'environnement. Dans [Baudouin et al.(2007)], l'environnement est exploré de manière discrète, en sautant d'un point de vue à un autre. Il est donc légitime de faire l'hypothèse que dans un point de vue donné (plan rapproché sur un appareil de mesure par exemple) l'information a bien été lue. Dans le projet 3D-VOR, les informations importantes dans les documents du dossier patient sont masquées et révélées après un clic du joueur [Lelardeux et al.(2017)]. De cette manière, la consultation d'une information devient une interaction et l'ambiguïté quant à la connaissance de cette information par le joueur est (en principe) levée.

La collecte et l'analyse des traces utilisateurs nourrissent deux objectifs : évaluer individuellement l'apprenant, et mesurer la qualité du jeu.

6.2 Évaluation de l'apprenant

L'évaluation des apprentissages dans un jeu sérieux fait traditionnellement appel à des données exogènes : le plus souvent, un test standardisé (prétest/post-test) portant sur le

contenu du scénario et la validation des objectifs. Cependant, certains avancent que malgré les résultats objectifs de ces pratiques, on ne sait pas réellement ce qui s'est joué à l'intérieur du jeu et ce qui a contribué au succès ou à l'échec de l'apprentissage [Galaup(2020)]. Le jeu étant considéré comme une boîte noire, seul le recours à d'autres questionnaires ou à des enregistrements vidéo permettent de faire le lien entre la performance mesurée et ce qui s'est passé dans le jeu [Loh & Sheng(2015a)]. De plus, pour [Shute et al.(2009)], il existe une incompatibilité entre ce qui est appris dans un environnement immersif, au gré de séquences d'interactions, et ce qui est évalué traditionnellement, à savoir la connaissance d'un certain nombre de faits (un fait - une question). En outre, de nombreuses qualités telles que la créativité, la persévérance, l'aptitude à résoudre des problèmes et la capacité à gérer de front plusieurs tâches, sont à la fois très développées dans les jeux vidéo et importantes dans la vie professionnelle, mais paradoxalement non évaluées dans le système éducatif, ou mal, à partir de problèmes schématiques qui ne reflètent pas la réalité des situations qui seront rencontrées dans le futur. En revanche, certains aspects périphérique à l'apprentissage mais néanmoins utiles peuvent être évalués par des questionnaires, comme par exemple identifier si l'apprenant est engagé dans l'activité par une authentique motivation intrinsèque ou par une motivation extrinsèque [Guay et al.(2000)]. De ce point de vue, la possibilité de collecter des traces et de les analyser en (quasi) temps réel constitue une réelle avancée dans l'évaluation de l'étudiant. Elle s'exprime à travers les points suivants.

Évaluation formative En premier lieu, alors que les techniques traditionnelles constituent une évaluation sommative, c'est à dire un bilan intervenant après l'apprentissage et ayant pour objectif de vérifier la bonne acquisition des savoirs, l'exploitation des traces ouvre la voie à une véritable évaluation formative. Formulée au début des années 70 par [Bloom(1971)], elle introduit les notions de contrôle continu des apprentissages et de *feedback* permettant à l'élève d'améliorer son travail de manière continue, ce qui a été démontré comme plus efficace [Black & Wiliam(1998)].

Évaluation furtive La collecte des traces dans le jeu et en cours de jeu, pratiquement à l'insu du joueur, est qualifiée d'évaluation «furtive» (*stealth assessment*, [Shute(2011)]). On lui prête de nombreux bénéfices. Premièrement, l'évaluation se déroule dans un environnement de test authentique et motivant : l'environnement même du jeu ou de la simulation. Deuxièmement, l'anxiété de l'évaluation est éliminée, et avec elle ses biais classiques comme celui de désirabilité sociale. Dernièrement, l'évaluation furtive est la seule à permettre une évaluation continue (i.e. en cours du jeu) qui ne menace pas de rompre l'état de *flow* pour lequel les concepteurs travaillent dur [Shute et al.(2009)]. [Kim et al.(2008)] apparentent la situation du joueur évalué dans le jeu à celle d'une boîte de Skinner, du nom du célèbre dispositif du psychologue behavioriste américain Burrhus Frederic Skinner. Travaillant sur le conditionnement animal, il eut l'idée d'un dispositif permettant d'enregistrer de manière automatique le comportement d'un animal dans un espace confiné. Son idée révolutionna la pratique expérimentale, grâce à plusieurs bénéfices qui s'appliquent de la même manière dans notre cas d'étude. D'une part, l'expérimentateur n'a pas besoin d'être présent, ce qui améliore grandement l'efficacité mais aussi la

fiabilité, en éliminant tout risque de biais. D'autre part, l'observation continue sur une durée plus importante qu'une expérience ponctuelle permet de mettre en évidence des motifs comportementaux impossibles à voir autrement. [Georgiadis et al.(2018)] tempèrent toutefois l'enthousiasme que suscite l'approche en pointant du doigt plusieurs inconvénients. Elle demande de nombreuses compétences informatiques que n'ont pas nécessairement les évaluateurs. Certaines compétences ne sont pas toujours facilement observables par le jeu, notamment les savoir-être (*soft skills*). Enfin, sa réutilisabilité est très limitée puisqu'un modèle est rarement transposable à un autre projet. En outre, [Kim et al.(2008)] font remarquer que les traces collectées sont souvent insuffisantes à l'interprétation, et prônent leur combinaison avec les données relatives à l'attitude de l'apprenant. Ils expliquent qu'un succès ou un échec seuls ne permettent pas de tirer une conclusion sans y apposer l'attitude du joueur, car l'échec peut être une source de motivation, comme le succès peut cacher un ennui ou une démotivation.

L'exploitation des traces de l'activité d'un apprenant nourrit des objectifs variés qui dépendent principalement de leur degré de raffinement. Si la trace brute n'a que peu d'intérêt, une première élaboration autorise déjà une remontée d'informations synthétiques au formateur [El-Kechai & Després(2007)], facilitant la tâche de ce dernier dans la recherche des causes des erreurs ou des actions erronées lors du débriefing de la session de jeu par exemple. Il s'agit là d'un premier bénéfice considérable, si l'on se réfère à [Crookall(2010)] pour qui l'apprentissage est le fruit du traitement mental par l'apprenant de son expérience en cours du jeu, qui est principalement mis en œuvre à la fin du jeu, justement lors de cette phase de débriefing. Un raffinement plus poussé permet d'associer des traitements automatisés, dans une logique de système tuteur intelligent. Par exemple, [Yannakakis & Hallam(2009)] propose un mécanisme d'adaptation automatique de la difficulté permettant d'optimiser la satisfaction du joueur dans un jeu. Dans [Jeanne et al.(2017)], les traces des utilisateurs permettent de détecter les erreurs commises durant l'exécution de gestes dans un EV3D et configurer en conséquence un système d'accompagnement utilisateur. Dans le projet V3S, l'activité de l'apprenant est communiquée via un système de messages à un module de suivi dénommé HERA [Amokrane et al.(2008)] qui a la capacité, en plus de détecter les erreurs de celui-ci, d'en dégager son plan d'action et ses intentions, pour alimenter le fonctionnement de l'ITS. Certains vont encore plus loin dans l'exploitation des traces et entreprennent de prédire les résultats d'une séquence de jeu à partir de l'activité observée. [Westera et al.(2014)] mettent en évidence plusieurs modèles capables de prédire la performance finale de l'étudiant à partir des traces collectées dans un ensemble de jeux présentés comme autant d'études de cas donnant lieu à la production d'un rapport noté. Ils établissent des corrélations entre les traces dans les jeux et les notes obtenues aux rapports. Dans *Use Your Brain* [Shute et al.(2016)], une version modifiée de *Plants Versus Zombies*, les relations statistiques entre indicateurs et compétences sont représentées dans un réseau bayésien dans lequel les nœuds sont des indicateurs et des compétences. Lorsqu'un indicateur prend une valeur ou change de valeur, à l'initiative du script et sur la base d'une observation dans le jeu, le signal est propagé et mène à l'activation de certaines compétences. D'autres travaux enfin considèrent que l'explicabilité du résultat est plus importante que sa prédiction et entreprennent d'expliciter les stratégies d'apprentissage des joueurs dans les environnements 3D, comme [Sabourin et al.(2013)]

dans l'EV3D *Crystal Island* ou [Min et al.(2015)] qui recourent à des techniques d'apprentissage profond. Dans le même esprit, [Bouvier et al.(2013a)] s'appuient sur la théorie de l'activité pour qualifier l'engagement de l'utilisateur dans la tâche d'apprentissage à partir des traces de son activité. Une autre exploitation possible de l'observation de l'activité est la catégorisation des joueurs selon un profil joueur ou apprenant, afin de potentiellement mieux adapter le contenu. [Guardiola(2014)] cherche à établir le profil d'un joueur à partir de sa façon de jouer en détectant des traits psychologiques. Dans [Drachen et al.(2014)] est proposée une comparaison de différentes méthodes statistiques de catégorisation des joueurs, appliquées à un vaste volume de données collectées dans le MMORPG *World of Warcraft*. En outre, les auteurs suggèrent que la mise à disposition des *game designers* de profils concrets et signifiants leur permet de faire évoluer le jeu dans le sens d'une prolongation de son intérêt.

En l'absence de modèle permettant l'interprétation ou le raffinement des traces brutes, une approche originale consiste à évaluer le comportement de l'apprenant par comparaison. [Osgouei & Choi(2012)] et [Loh & Sheng(2015b)] proposent ainsi une indication de l'expertise d'un joueur en comparant son comportement avec celui d'experts enregistrés dans des situations analogues. [El-Kechaï et al.(2015)] rapporte un autre exemple d'application de la méthodologie ECD à un jeu sérieux ayant pour thème la physique et organisé sous forme d'activités. La performance sur chaque tâche est évaluée par comparaison avec celle d'un expert, qui est encodée par un réseau de Petri. L'évaluation individuelle se présente sous la forme d'une liste de compétences valuées par des pourcentages de maîtrise. Si la collecte des données à l'échelle d'un joueur a pour objectif de fournir des données nécessaires individuellement à son évaluation ou son accompagnement, les traces collectées à l'échelle d'une population de joueurs ont le pouvoir de révéler des failles dans le jeu en appliquant la logique suivante : si de nombreux joueurs commettent la même erreur, peut-être ce passage a-t-il été mal conçu ?

6.3 Évaluation du jeu

Évaluer la qualité du jeu, en termes de capacité à atteindre son objectif ou de satisfaction, est une autre problématique récurrente dans les jeux sérieux ou les jeux d'apprentissage immersifs.

L'approche traditionnelle consiste à essayer de démontrer la meilleure efficacité du jeu, en comparaison d'un enseignement traditionnel portant sur les mêmes contenus ou compétences (i.e. *media comparison studies*). Ces recherches n'ont pas à ce jour montré de résultat concluant [Loh et al.(2015)]. Notamment, ces études sont considérées comme biaisées car elles comparent un outil numérique avec un enseignant dont la compétence et l'expérience ne peuvent pas être normalisées. Les pré-tests/post-tests représentent la voie générale. Elle n'est pas exempte de défauts (temps de jeu souvent limité, et collaboration entre les étudiants) mais elle permet de relativement bien déterminer si le jeu a rempli son rôle. Par la force des choses, enquêtes et questionnaires représentent le plus gros des études publiées. Différents critères sont testés, souvent dans la même étude, et s'appuient sur des questionnaires existants comme SUS-A [Brooke et al.(1996)] ou *Computer Usability Satisfaction Questionnaire* [Lewis(1995)] pour l'utilisabilité d'un système inter-

actif, AttrakDiff [Lallemant et al.(2015)] ou UEQ [Schrepp et al.(2014)] pour l'évaluation de l'expérience utilisateur, ou bien encore le *Game experience questionnaire* [Ijsselstein et al.(2013)] qui se réfère à sept composantes propres aux jeux : immersion, *flow*, compétence, tension, émotions positives et négatives, défi. Le cadre conceptuel de [Tricot(2007)] développé pour les EIAH reconnaît l'importance égale de trois dimensions que l'auteur juge indissociables : utilité, utilisabilité et acceptabilité. Ces tests sont faciles à produire mais ils sont subjectifs par nature, et donc généralement considérés comme biaisés car les réponses des participants sont souvent orientées par ce qu'ils considèrent des attentes des chercheurs (biais de désirabilité sociale).

L'exploitation des traces apporte une objectivité à l'évaluation du jeu que les témoignages ne peuvent remplacer, notamment en ce qui concerne l'utilisabilité [Galaup(2020)]. D'éventuelles faiblesses de *game design*, trahies par le suivi des chemins ou des décisions des joueurs (lieux jamais explorés, quêtes trop souvent perdues, etc.) peuvent ainsi être corrigés pour améliorer le jeu. Par exemple, [Véron et al.(2014)] se servent du profil du joueur pour sélectionner des adversaires équilibrés. Dans la conception de jeux vidéo, la technique de *weakness modification learning* utilise des algorithmes de l'IA pour faire progresser les PNJ en apprenant de leurs défaites contre les joueurs. C'est par ailleurs une approche similaire que [Orkin & Roy(2008)] utilisent pour modéliser de manière automatique les comportements des hôtes de son restaurant virtuel. Selon la terminologie employée dans [Hoareau et al.(2017)], les évaluations d'utilisabilité des EV3D relèvent de la validité interne, c'est à dire la capacité de l'outil à soutenir l'apprentissage. Ils s'interrogent sur la capacité des traces à évaluer également la validité externe d'un EV3D, c'est à dire la transposabilité des savoirs et des compétences acquises, dans un cadre d'apprentissage d'une longue procédure.

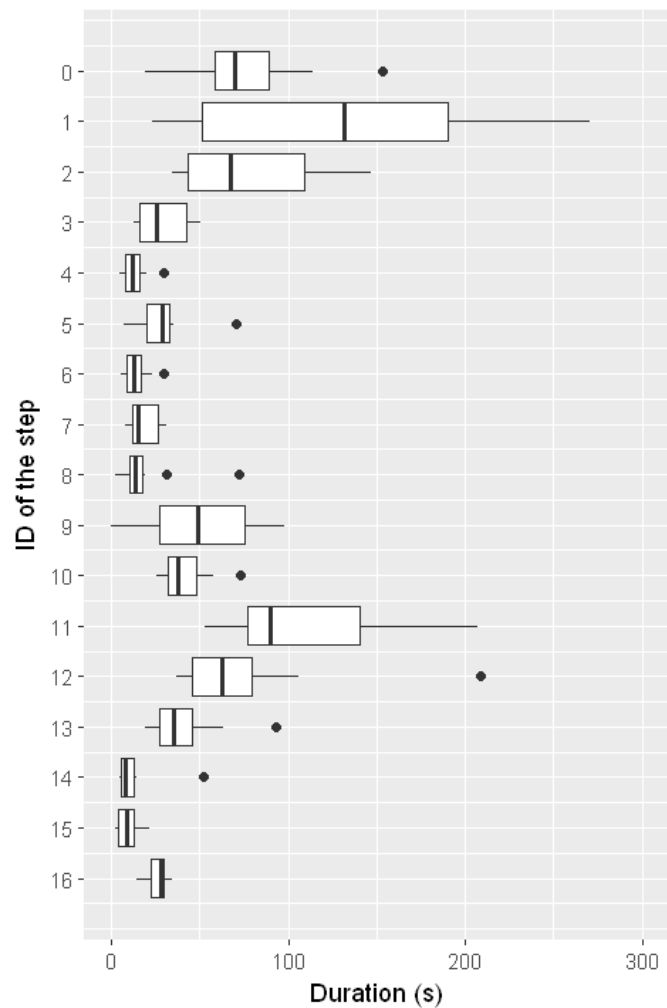
6.4 Contributions

Mesure de la qualité des interactions dans Meca 3D

Dans Meca3D, l'activité de l'utilisateur est collectée à des fins d'amélioration de la qualité des interactions [Muller(2019)]. Certaines interactions sont annotées comme démarrage ou fin d'une étape. De cette manière, la durée de chacune est mesurée au cours de sa réalisation par l'apprenant. La représentation statistique des durées pour une population-test de joueurs, comme illustré dans la figure 6.1, permet d'observer certaines propriétés liées à la conception. La durée montre la complexité de la tâche, et on observe que certaines prennent logiquement plus de temps à réaliser : mobilisation de connaissances, précision de la manipulation, etc. Le temps moyen de complétion de la tâche est par conséquent un bon indicateur de la difficulté intrinsèque de chaque tâche, et donc du crédit qui devrait lui être accordé dans l'évaluation. En revanche, l'observation de la variance, symbolisée dans la figure par les boîtes à moustache, témoigne d'une mauvaise conception pédagogique ou ergonomique de la tâche, indépendamment de sa difficulté. Une grande variance est en effet révélatrice de problèmes individuels, qui peuvent s'expliquer par un manque d'accompagnement utilisateur ou une mauvaise ergonomie de la tâche. Dans le premier

FIGURE 6.1 – *Durée moyenne (n=12) et variance des étapes du scénario de Meca 3D.*

- 0 Sélection du tour manuel
- 1 Réglage du zéro
- 2 Opération de tournage
- 3 sélection du tour CN
- 4 Ouverture de la porte coulissante
- 5 Mise en place du charriot de la contre-pointe
- 6 Réglage de la vis 1 (haut)
- 7 Réglage de la vis 2 (bas gauche)
- 8 Réglage de la vis 3 (bas droite)
- 9 Centrage de la poupée mobile
- 10 Sélection de la sonde du palpeur
- 11 Palpage du haut de la pièce
- 12 Palpage de la face de la pièce
- 13 Sélection de l'outil d'usinage
- 14 Fermeture de la porte coulissante
- 15 Mise en position de la poupée mobile
- 16 Lancement du programme



cas, l'utilisateur perd du temps car il ne sait pas ce que l'application attend de lui ; dans le deuxième, il sait ce qu'il doit faire mais une ergonomie approximative rend le succès de la manipulation dépendant de la chance et du hasard.

Traces des clients virtuels dans Format-Store

La figure 6.2 illustre la collecte des traces de personnages parcourant de manière autonome un EV3D, en l'occurrence ici un supermarché virtuel dans le projet Format-Store. Il s'agit des traces laissées par les clients virtuels dont le comportement est régi par une intelligence artificielle, néanmoins il pourrait tout aussi bien s'agir des traces joueurs. Cette illustration permet aussi de montrer que la visualisation des traces brutes peut montrer un intérêt dans certaines situations. Dans ce cas, il s'agissait de vérifier visuellement que tous les rayons du magasin étaient bien explorés par les clients virtuels (ce qui manifestement n'est pas le cas).



FIGURE 6.2 – *Traces laissées par des personnages dans le supermarché virtuel du projet Format-Store*

Le suivi de la performance dans Format-Store

Dans le projet Format-Store, la satisfaction moyenne des clients virtuels est suivie dans le but d'adapter en temps réel la difficulté de la tâche à réaliser par l'apprenant. La satisfaction est calculée à partir de l'état du magasin, de la disponibilité de l'apprenant (conseiller en gestion clientèle) et des réponses que ce dernier apporte à leurs requêtes. L'hypothèse suivante est donc faite : lorsqu'il y a trop de clients dans le magasin, celui-ci nécessite plus de maintenance (casse, réapprovisionnement, etc.) et il y a logiquement plus de requêtes et moins de temps à y consacrer. Rapidement, l'apprenant ne peut plus faire face à l'ampleur de la tâche. L'algorithme de gestion de la population des clients virtuels en tient compte en adaptant le nombre de clients dans le magasin (i.e. les clients qui sortent sont moins remplacés). La figure 6.3 montre dans une session de jeu de 20 minutes de quelle manière ce mécanisme permet de maintenir le joueur dans une zone de *challenge* adapté [Mathieu et al.(2013)].

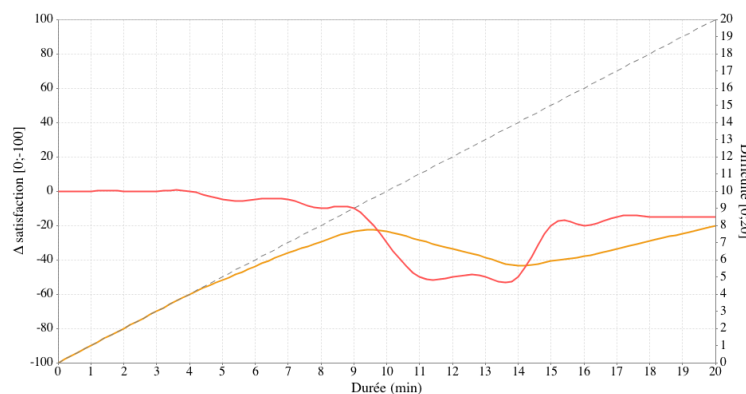


FIGURE 6.3 – *Adaptation en temps réel de la difficulté à la performance du joueur. Lorsque la satisfaction chute (courbe rouge, 9^{ème} minute) car la tâche devient trop écrasante, l'application régit en diminuant le nombre de clients virtuels simultanés (courbe orange) jusqu'à ce que le joueur reprenne le contrôle.*

6.5 Bilan du chapitre

Bien que les outils numériques aient été adoptés de longue date pour la formation, c'est pourtant récemment que l'intérêt pour la collecte des traces a commencé à révéler tout son potentiel. Dans les jeux d'apprentissage immersifs, beaucoup reste encore à faire sur le sujet, mais les concepteurs de jeux d'apprentissage immersifs commencent à mesurer l'importance de développer des métriques et des indicateurs spécifiques, capable de prendre en compte de manière intégrée les bénéfices immersifs et ludiques inhérent à ces applications. L'enjeu, c'est la possibilité, grâce à la richesse et à la complémentarité des données pouvant être collectées dans un environnement où rien n'échappe au concepteur, d'une analyse plus fine et plus continue des motivations, des intentions voire des émotions, avec à la clé une évaluation mieux documentée, à la fois plus globale et une interprétation plus pertinente des actions observées.

À plus longue échéance, cette capacité de collecte massive est une condition nécessaire à l'usage des techniques d'apprentissage automatique en remplacement de la conception manuelle des scénarios et des environnements (lire à partir de la page 97 les idées développées dans notre projet de recherche), ou du moins pour soulager une part substantielle du travail du concepteur. Il existe de nombreuses techniques, mais toutes ont en commun pour opérer (i.e. pour apprendre) l'exigence d'un flux constant de données le plus dense et le plus détaillé possible, ce que l'EV3D est parfaitement à même de remplir.

7 | Conclusion

7.1 Le futur de l'apprentissage immersif

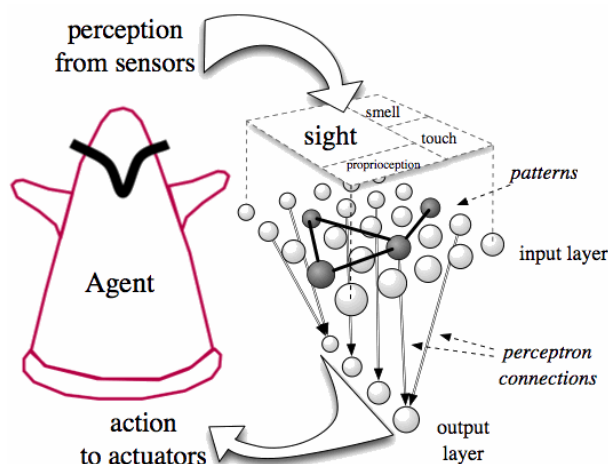
La formation en VR n'est plus un fantasme de science fiction mais une réalité vécue quotidiennement dans des nombreuses grandes entreprises à travers le monde, et qui se développe rapidement à l'école ou pour le grand public.

Bien qu'ils puissent porter une dimension pédagogique plus large que la formation technique, comme par exemple la reconstitution historique d'un événement ou d'un lieu célèbre, c'est pourtant dans la formation, l'entraînement et la gestion de crise que les environnements virtuels s'imposent aujourd'hui comme un médium privilégié. Leurs contextes de prédilection, dans lesquels on compte une partie importante des projets, sont les ateliers de production ou de maintenance, les infrastructures industrielles ou les espaces commerciaux, les blocs opératoires ou encore les bâtiments publics.

Point commun à ces contextes hétérogènes, deux composantes caractérisent de manière intégrante l'intérêt d'une formation expérientielle. D'abord, un environnement qui s'apparente à un écosystème complexe et hautement dynamique, dans lequel la ramification des conséquences de chaque action ou décision peut difficilement être appréhendée avec des règles simples et rigides. Ensuite, la collaboration indispensable entre les acteurs et les machines, ou les acteurs entre eux, dont la synergie des compétences est le carburant du fonctionnement quotidien, ou le recours le plus fiable en cas de crise. Deux facteurs que les formations traditionnelles ont du mal à aborder, et pour lesquelles les jeux d'apprentissage immersifs peuvent s'imposer comme une ressource complémentaire pertinente.

Or, les formations VR doivent essentiellement leur essor récent à l'avènement des moteurs de jeu grand public, avec en première ligne Unity 3D, qui reste encore aujourd'hui incontournable, mais aussi Unreal Engine et plus récemment Godot. En se rendant accessibles financièrement et techniquement aux universitaires et à une multitude de modestes studios indépendants ayant fait le choix du jeu à visée pédagogique et de la formation, ils ont largement accéléré la production d'EV3D de qualité. De manière conjointe, le matériel VR et AR permettant la visualisation de ces mondes et les interactions avec eux n'a cessé de se développer et de s'ouvrir à la communauté la plus large. Ainsi, j'ai constaté au fil des ans que la difficulté dans la conception d'un jeu d'apprentissage immersif n'était plus vraiment l'accès à la technologie, et de la même manière que le critère de son succès n'était plus vraiment la qualité visuelle ou l'ergonomie des contrôles, ces éléments étant désormais largement pris en charge par le moteur graphique ou le matériel. Ce qui consti-

FIGURE 7.1 – *L’architecture Cortexionist est une architecture connexionniste hybride qui s’inspire du fonctionnement du cortex pour tenter d’expliquer comment des comportements hérités peuvent être « augmentés » chez un individu par des connaissances acquises dans l’environnement de manière autonome et non supervisée.*



tue le défi principal au cœur de la conception d’un jeu d’apprentissage immersif, c’est la capacité à traduire un savoir – dans le sens le plus large du terme : une connaissance, une compétence technique ou relationnelle, etc. – en une expérience interactive dans l’EV3D. Qu’on l’appelle scénarisation, conception pédagogique, *game design* ou encore *authoring* lorsqu’il est rendu accessible à l’utilisateur, le processus qui consiste à mettre en regard d’un objectif pédagogique une série d’interactions scénarisées reste une démarche profondément périlleuse. Les progrès technologiques des moteurs de jeu et du matériel, ainsi que les avancées dans le domaine des IHM 3D, loin de simplifier cette tâche, ont graduellement ouvert en grand le champ des libertés, rendant tout techniquement possible, mais pédagogiquement incertain. Il en découle que l’existence d’applications fonctionnelles et utilisées ne masque pas pour autant la subsistance de nombreux verrous, dont certains sont au cœur des problématiques que j’ai choisi d’aborder dans mon projet de recherche.

7.2 Projet de recherche

Mes travaux de thèse portaient sur la modélisation de comportements intelligents pour des créatures artificielles destinées à peupler des environnements virtuels (jeux, simulations, etc). L’axe que j’ai exploré visait à identifier les bénéfices des processus naturels – ou inspirés par la nature – que sont l’apprentissage ou l’évolution, par opposition aux modélisations manuelles en vigueur : modélisation par un script, un système expert, une architecture cognitive symbolique, etc. Ces travaux ont donné lieu à la proposition d’une architecture connexionniste pour fabriquer des contrôleurs comportementaux, illustrée dans la figure 7.1.

D’un point de vue personnel, une des leçons les plus importantes de ce travail fut d’adopter un point de vue écologique sur l’intelligence de mes créatures, puis par extension sur l’intelligence en général. Dans les simulations que j’ai conçues durant ma thèse, l’intelligence se révélait comme la capacité à tirer avantage des invariants de l’environnement¹⁹. Ces invariants se présentent sous la forme de régularités, de motifs, de cycles,

19. Cette vision volontairement réductrice avait l’intérêt de se prêter à des modélisations informatiques simples inspirées par le courant de la vie artificielle.

temporels ou spatiaux, qui reflètent une structuration pré-existante de l'environnement dans lequel la créature évolue. La capacité à tirer parti de ces invariants suppose ensuite deux choses. D'une part, des structures neuronales et des processus associés permettant leur détection et leur mémorisation sous la forme de connaissances (implicites ou explicites, je ne rentrerai pas les détails ici). D'autre part, la capacité à intégrer avantageusement et durablement ces connaissances nouvelles dans son comportement : anticiper certaines actions, prendre des décisions différentes, et enfin, pour clore et relancer le cycle, mettre à sa portée l'identification de nouveaux invariants qui étaient jusqu'alors plus difficiles à percevoir.

C'est un principe similaire qui est au cœur des jeux d'apprentissage immersifs, où un apprenant immergé dans un environnement structuré est amené, en vivant à la première personne une expérience pédagogiquement calibrée, à développer des savoirs et à les intégrer à ses propres représentations mentales, dans le respect de sa façon de penser et d'apprendre. L'apprentissage expérientiel de Donald Kolb fournit d'ailleurs le cadre théorique des processus à l'œuvre durant ces explorations. Le joueur humain (la créature, par analogie avec mes travaux antérieurs) possède toutes les structures et processus neuronaux nécessaires pour acquérir le savoir et s'en servir par la suite avec intelligence. En regard de ce dernier, l'environnement virtuel se doit ainsi de disposer de tous les motifs, de toutes les relations, en somme de la structuration nécessaire à la mise en œuvre de ce processus de fabrication des savoirs par les apprenants immergés. C'est ce travail de structuration de l'environnement qu'on retrouve dans la phase de scénarisation du jeu, et qui prend des formes différentes comme on l'a vu tout au long des chapitres précédents : disposer et aménager les objets, définir leurs modalités d'interaction, instruire et simuler les processus qui président à la dynamique du monde, écrire les rôles des personnages non joueur, etc. ²⁰

Les limitations qui privent actuellement ces outils d'atteindre le potentiel que lui accordent les théories sur l'apprentissage expérientiel doivent être imputées, selon mon opinion, à la négation du rôle prépondérant de l'environnement virtuel dans le dispositif d'apprentissage. L'environnement est encore souvent réduit à la scène dans laquelle doit se dérouler l'activité menant à un apprentissage, alors que cette dernière est représentée de manière externalisée, dans son propre formalisme. Au contraire, l'environnement virtuel devrait être considéré comme la seule interface par laquelle le concepteur pédagogique, le *game designer* ou l'ingénieur en gestion des connaissances pense et construit la scénarisation de l'apprentissage.

L'orientation que je souhaite donner à mes recherches vise à aborder deux problématiques sous un angle nouveau : la manière dont les données du scénario pédagogique sont recueillies d'une part, et la manière dont elles sont représentées numériquement d'autre part.

20. D'ailleurs, en poursuivant l'analogie, on peut aussi avancer que les mesures d'accompagnement implantées par le concepteur dans le jeu d'apprentissage immersif exploitent simplement la capacité d'un environnement augmenté à mettre en évidence des relations ou des invariants qui n'ont pas été perçus par le joueur, soit en temps réel (indices visuels, notifications graphiques ou sonores, etc.) soit rétrospectivement (débriefing, *reporting*, etc.).

Acquisition des données pédagogiques

La conception d'une expérience pédagogique immersive débute invariablement par une tâche de recueil et de numérisation des savoirs. Le recueil s'effectue *in situ* auprès d'experts du domaine ou de formateurs (idéalement) sous forme d'entretiens, ou bien par l'analyse d'enregistrements vidéos de l'activité [Galaup(2013)]. Plus rarement, des manuels ou des écrits viennent compléter ces informations. La numérisation consiste à représenter les savoirs verbalisés sous une forme qui puisse être interprétée par le programme ultérieurement. Plusieurs formalismes informatiques se prêtent à cette exigence : graphe d'activité BPMN, arbres décisionnels, cartes mentales, etc. Dans tous les cas, ce travail requiert une bonne dose de modélisation manuelle. Et cette approche très classique de la conception de l'outil impose de nombreuses limitations :

- Bien évidemment, la première est d'être un processus très fastidieux, car les scénarios font souvent intervenir de nombreuses interactions. En outre, il est compliqué pour le gestionnaire des connaissances de prévoir toutes les possibilités d'évolution d'un scénario.
- La combinatoire de ces nombreux embranchements se heurte rapidement aux limites des représentations informatiques. Préserver la cohérence de tous les chemins se révèle rapidement très complexe.
- Le recueil manuel met également en évidence la différence existante entre pratique prescrite et expertise. En modélisant l'activité telle qu'elle est consignée dans le normatif ou exprimée par le formateur, le gestionnaire des connaissances est souvent enclin à rater ce qui caractérise l'expertise.
- L'expertise est parfois non verbalisable, souvent implicite et mise en oeuvre par l'expert de manière inconsciente : de nombreux détails peuvent ainsi échapper à la modélisation, que l'expert aura oublié de mentionner en entretien car ils sont évidents pour lui.
- Enfin, la modélisation explicite des savoirs impose une dichotomie entre la tâche prescrite et l'erreur, alors qu'en réalité il n'est pas opportun de décréter qu'une déviation constitue une erreur sans prendre en compte le contexte ni l'intégralité de ses effets sur l'environnement.

Représentation des données pédagogiques

Le résultat du processus d'acquisition des savoirs se présente très fréquemment sous la forme d'une description chronologique de l'activité, d'une représentation structurée des objectifs (sous forme arborescente généralement) ou bien un mélange des deux. Cette description externalisée, pensée avant tout pour être intelligible, doit ensuite être couplée à l'environnement virtuel dans lequel se déroule l'activité. Il s'agit d'une opération manuelle qui vise à associer des jalons du scénario ou des objectifs à des actions ou interactions spécifiques dans l'environnement ; la réalisation de l'action en question ayant pour effet de valider le jalon ou de cocher l'objectif. À nouveau, d'importantes limitations sont dues à cette représentation des données :

- La liberté et la créativité de l'apprenant sont souvent les premières victimes de cette modélisation rigide : le spectre des actions qui lui sont accessibles dans l'en-

vironnement est celui qui a été défini par le concepteur, c'est à dire la bonne marche à suivre, souvent agrémentée de quelques chemins alternatifs peu profonds et de quelques actions «pièges» permettant de disqualifier hâtivement son comportement.

- Le niveau de granularité qu'on accorde à la description des actions se révèle souvent un problème épineux, d'autant plus qu'il conditionne le niveau de finesse des interactions que le concepteur devra implanter par la suite. Or, si on ne peut nier une certaine logique à cet ordre, on peut tout de même reprocher que l'absence d'information sur les éléments/objets qui sont amenés à constituer l'environnement par la suite peut être handicapant lors de la numérisation de l'activité.
- Enfin, les actions des personnages non joueurs sont souvent stéréotypées, du fait d'une compréhension réduite du contexte de l'interaction avec l'apprenant, ce qui les cantonne à jouer une partition indifférente.

7.2.1 Proposition

L'objectif de ma proposition est de garantir une mise en oeuvre de l'activité pédagogique conforme à ce qui a été décrit lors de la conception, mais avec des critères de liberté, de créativité, de cohérence (conséquences des actions, même non prévues) et de traçabilité (accompagnement, évaluation) inédits. En outre, cette proposition intègre dès sa genèse une contrainte primordiale : la possibilité de faire intervenir des personnages non joueurs dotés de la même liberté que les joueurs humains, et à différents niveaux d'interaction avec ces derniers.

Il s'agit d'adopter un paradigme différent dans lequel le scénario pédagogique est intégralement représenté à travers l'environnement, sa dynamique, et bien entendu d'éventuels paramètres initiaux. En d'autres termes, l'unique résultat du processus de scénarisation de l'expérience d'apprentissage est un environnement apte à accueillir un ou plusieurs apprenants et à les accompagner tout au long de l'activité. Dans ce paradigme, les objectifs sont des états de l'environnement à atteindre, à maintenir ou à éviter ; la dynamique d'évolution de l'environnement est inscrite dans les relations entre les objets ; et le scénario pédagogique n'est représenté qu'implicitement à travers l'ensemble des itinéraires qui mènent à la réalisation conjointe des objectifs en empruntant les chemins autorisés par la dynamique de l'environnement. Concrètement, l'environnement peut être modélisé par un graphe où les noeuds sont les entités du monde et les arcs les relations qui les lient entre eux. La dynamique du monde s'apparente à un simulateur dans lequel chaque action a des conséquences sur les objets concernés mais parfois bien au delà. Certes il est plutôt courant qu'un environnement virtuel de formation soit enrichi avec un simulateur mais celui-ci est restreint au périmètre d'une machine ou d'un sous-système de l'environnement. Il est souvent non connecté aux autres objets, car il est plus facile de cloisonner pour diminuer la complexité des relations. Or, la formation immersive doit mettre en évidence ces relations a priori non apparentées qui constituent la complexité globale du système, car c'est de la méconnaissance de ces dernières que les erreurs surviennent généralement, beaucoup plus en tout cas que la méconnaissance de telle machine ou tel protocole. C'est la nature même de la formation immersive (expérientielle) que de mettre en lumière ce que les formations traditionnelles à l'utilisation des machines, au respect du protocole, à la communication

avec les collaborateurs, etc. ne peuvent pas aborder du fait de leur indépendance mutuelle.

L'absence d'une description formelle du scénario rend envisageable une nouvelle stratégie de recueil des savoirs, qui s'affranchit des limitations précédemment énoncées. Cette stratégie conçoit la construction automatique de l'environnement informé par l'enregistrement dans l'environnement de l'activité d'un ou plusieurs experts reproduisant la tâche au cœur de l'apprentissage. L'analyse (partiellement) automatisée d'une ou plusieurs séquences produites par un ou plusieurs experts ne produit pas nécessairement de description intelligible de l'activité – bien que ce soit possible, à des fins de vérification par exemple – mais alimente un algorithme dont l'objectif est de produire une description fonctionnelle de l'activité enregistrée et analysée. L'algorithme fait des hypothèses concernant l'intention de l'expert en inférant :

- Le rôle ou la fonction de chaque objet : chaque interaction s'apparente ainsi à une fonction transposant l'environnement d'un état courant i vers un état suivant j . Par extension, chaque plan ou sous-plan de l'activité se rapporte à une composition de fonctions vers un état final ou jalon.
- Les effets sur les autres objets : les relations entre les objets pourraient être minées de manière automatique – ou plus vraisemblablement proposées par l'algorithme – lors de l'analyse, à partir des co-occurrences observées, et avec le renfort éventuel d'ontologies fournies en entrée du processus.

7.2.2 Défis

Sans retrouver le niveau d'explicabilité d'un processus manuel de recueil des savoirs et de conception pédagogique, l'approche décrite dans les paragraphes précédents qui consiste à transposer une forme d'enregistrement brut de l'activité d'un expert en une expérience interactive répond à de nombreuses problématiques qui freinent encore l'essor des formations immersives, particulièrement dans les domaines où l'expertise est difficilement explicitable. Bien que cette proposition relève d'un objectif à long terme, les étapes qui en jalonnent la mise en œuvre et la réussite constituent autant de défis dignes d'intérêt pour la communauté scientifique. Les paragraphes ci-dessous détaillent trois jalons importants de cette progression, et évoquent leur faisabilité en les rattachant à des travaux de recherche concrets et récents.

Approche décentralisée et algorithme «tour de contrôle»

Le premier défi consiste à changer la manière dont les EV3D sont structurés. L'approche consistant à penser chaque objet comme une entité logicielle cloisonnée et caractérisée par ses attributs esthétiques ou physiques est facilitante pour qui modélise l'environnement 3D, mais très limitante pour qui doit modéliser l'activité à l'intérieur de l'EV3D. Dans un environnement métier qui s'apparente plus à un écosystème hautement dynamique qu'à une maison de poupée, inanimée et décorée çà et là de petits meubles colorés, les relations entre les composants (hiérarchiques, de voisinage géographique ou sémantique, etc.) doivent faire partie intégrante du modèle de l'EV3D dans lequel l'activité prendra place. La notion de maillage s'impose comme un modèle explicatif pertinent, en reconnaissant

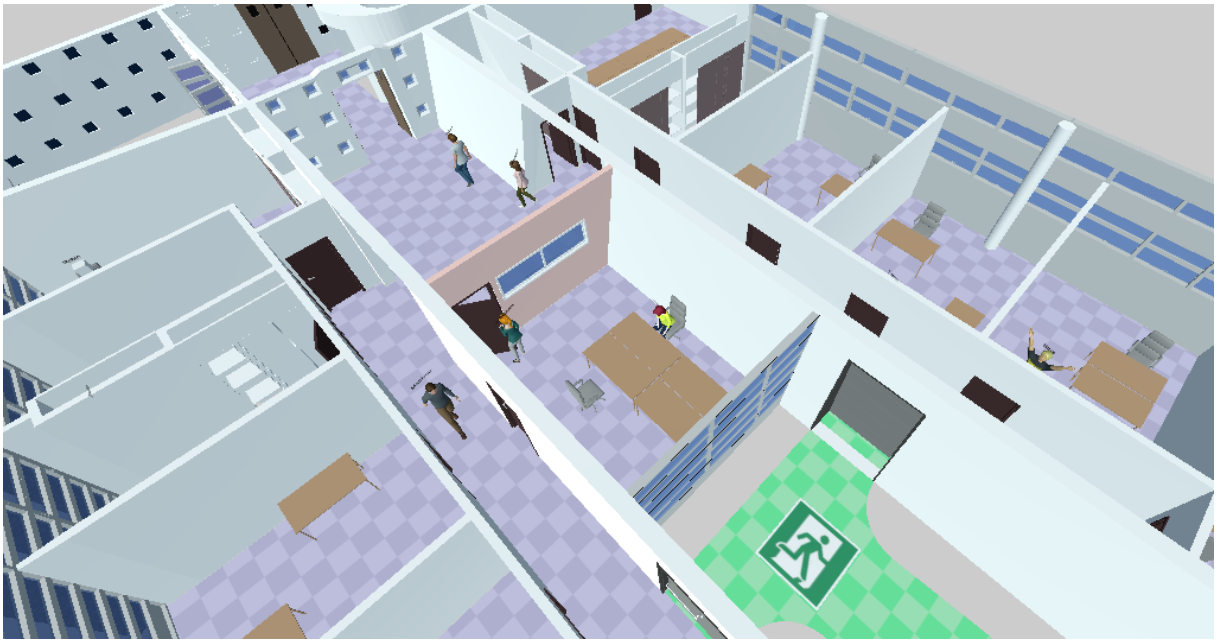


FIGURE 7.2 – *Au déclenchement de l’alarme incendie, les occupants du jumeau virtuel de l’IMT évacuent le bâtiment. Selon les règles du scénario, certains personnages sont coincés par l’incendie et seront libérés par actions des apprenants dans l’EV3D.*

l’intérêt supérieur des arêtes (l’influence d’un élément sur un autre) sur celui des nœuds (le fonctionnement individuel de tel élément).

Une première expérimentation a été conduite dans le cadre d’une collaboration scientifique avec le groupe de recherche CGI de l’IMT Mines d’Albi, et dans le cadre du projet EGCERSIS où j’ai participé à la conception du comportement des personnages non-joueurs dans une simulation immersive de gestion de crise. Cette expérimentation a permis d’explorer un des bénéfices de cette approche en proposant une modélisation décentralisée des comportements des occupants du bâtiment virtuel, inspirée par l’approche MAS IODA [Kubera et al.(2008)]. L’environnement est densément enrichi de nombreux objets dont la dynamique est voulue simpliste (pour les besoins de la simulation) : bureaux, machine à café, photocopieurs, portes, panneaux signalétiques. Le contrôle des personnages est ensuite intégralement inversé, c’est à dire confié “aux mains” des objets qui parsèment l’environnement, à la manière du maillage d’un territoire par un dispositif de contrôle aérien. Chaque objet, semblable à une tour de contrôle supervisant une zone de l’environnement, peut ainsi donner des instructions aux personnages et aux autres objets à proximité. Dans l’exemple d’EGCERSIS, cela vaut aussi bien pour l’activité quotidienne des occupants (travailler à son bureau, rencontrer des collègues en allant chercher des impressions, céder le passage devant une porte, etc.) que durant l’évacuation où les panneaux de signalisation et les issues du secours jouent un rôle actif dans l’orientation dynamique des personnages, au gré du développement de l’incendie.

On retrouve dans cette approche une inspiration des organisations dites “holoniques” qui misent sur la décomposition d’un système en composants hiérarchiques munis de

capacité de contrôle local. À travers ses travaux sur MASCARET, [Chevaillier(2006)] a par exemple parfaitement illustré la faisabilité d'une telle organisation décentralisée dans la conception d'EV3D pour la formation. La critique qu'on pourrait cependant formuler à l'égard de cette démarche réside dans la conception individuelle et cloisonnée de chacun des composants et de leur logique comportementale.

Approche fonctionnelle, filtrage et inférence

Le second défi consiste à changer la manière dont les EV3D sont pensés. Il s'agit conceptuellement de se détacher d'une logique de changements d'états au profit d'une approche fonctionnelle dans laquelle chaque constituant de l'écosystème (ou du système holonique, pour reprendre la comparaison de la section précédente) est reconnu avant tout pour son rôle dans l'activité. Jusqu'à présent en effet, les EV3D sont construits de manière empirique, par assemblage de composants modulaires dont l'observation préalable de l'activité a laissé penser qu'ils joueraient un rôle dans cette dernière, ou du moins qu'ils participeraient à donner un certain réalisme à la scène. C'est seulement ensuite que le concepteur cherche à plaquer la logique du processus métier collectée préalablement (voir le chapitre 1). Or, en adoptant un point de vue de l'ingénierie des systèmes, alors une approche analytique (ou descendante) pourrait être favorisée. Elle consisterait à proposer une analyse fonctionnelle, dont le rôle serait d'aboutir, par décomposition itérative et hiérarchique, à l'obtention d'une architecture logique, dans laquelle il est possible, à renfort d'algorithmes, d'inférer des intentions aux acteurs et du sens à l'activité. C'est ensuite dans un deuxième temps qu'on retrouverait alors la notion d'architecture structurelle, c'est à dire les composants et leurs interfaces.

Des algorithmes ayant pour objet le filtrage de l'activité brute et la formulation d'inférences sur les intentions et les conséquences de cette activité seraient au centre de ce dispositif, épaulés par l'humain de la manière suivante. La construction de l'EV3D plonge l'expert dans un environnement de prime abord vide. Il est en relation permanente avec deux interlocuteurs dans le monde réel : un ingénieur, qui a la capacité de modifier l'EV3D ; un didacticien, qui a pour mission d'orienter et de rythmer la construction de l'activité. L'expert décrit ce que d'ordinaire il voit, ce à quoi il doit faire attention, les actions qu'il effectue, etc. En temps réel l'ingénieur place et agence des objets grossièrement modélisés ou des personnages²¹. En parallèle, le didacticien cherche à établir le sens et les conséquences de chaque action, en décrivant les transformations qui ponctuent le déroulement de l'activité, sous le coup des actions directes de l'expert, ou bien indirectement par influence d'un objet sur un autre. Ces informations sont consignées sous forme d'annotations à l'usage des algorithmes. L'utilisation d'annotations pour la conception collaborative de produits (automobile, aéronautique, etc.) est une application assez courante depuis l'avènement de la VR [Aubry(2007)], mais peu utilisée pour la conception d'environnements 3D, encore moins à vocation pédagogique. La reconnaissance de l'activité humaine (ou *process mining*), quant à elle, constitue un champ de recherche en plein essor [Sarray(2019)], à

21. À l'instar de l'illustre paradoxe de l'œuf et de la poule, il est complexe de dire qui doit précéder l'autre, de l'activité et de l'environnement dans lequel se déroule cette activité. La construction itérative des deux en parallèle, telle que décrite ici, est une façon simple, peut-être naïve, d'éluder le problème.

ce jour essentiellement basé sur l'analyse d'enregistrements vidéos, mais dont on imagine sans peine qu'il pourrait être adapté à des activités capturées dans un EV3D. Les recherches de [Caillaud(2013)] laissent entrevoir une telle possibilité d'automatisation : l'auteur propose un modèle connexionniste baptisé *Test & Flip networks* pour miner des processus chirurgicaux à partir de données XES (une représentation XML de données événementielles).

Apprentissage automatique et détection des structures

Enfin, le troisième défi consiste à changer la manière dont les EV3D sont édités. Jusqu'à présent, les idées développées dans ce projet de recherche, bien qu'elles soient ambitieuses, ne se départissent pas de l'intervention humaine et d'une édition des contenus manuelle (ou assistée). Pourtant, une piste suggère qu'il pourrait être possible, à long terme, de confier l'intégralité de la conception d'un environnement d'apprentissage immersif à des algorithmes. Cette piste, c'est celle de l'apprentissage automatique dans les grands jeux de données, une discipline à très haut potentiel dont la majorité des applications restent encore à écrire. Dans le contexte de ce projet de recherche, le principe est le suivant : Un environnement est à disposition d'une population d'experts de la tâche faisant l'objet de la modélisation pédagogique. Ces derniers sont invités à la reproduire, à de multiples reprises, dans des conditions qu'un algorithme peut décider de faire varier au fil des rejeux, en simulant (de manière pertinente ou non d'ailleurs) la variabilité des situations possibles. Le rôle de l'algorithme d'apprentissage, c'est de généraliser, à partir des traces de toutes ces tentatives, des comportements représentatifs et des plans, qui d'une part constitueront une représentation de la tâche prescrite, et d'autre part intégreront toutes les variations possibles en cours d'activité. C'est typiquement ce que [Orkin & Roy(2008)] sont parvenus à faire dans "The restaurant game", hormis que leurs travaux concernent uniquement la représentation de l'activité et n'intègrent pas la notion d'objectif pédagogique, qui constitue de ce fait un défi supplémentaire.

Pour aller plus loin, on peut aussi prophétiser un jour lointain l'utilisation de tels algorithmes sur des collections d'enregistrements vidéos de la tâche réalisée par les experts. En plus de l'activité à proprement parler, on peut imaginer que la dynamique de l'environnement et des objets qui le composent puisse être «minée» de la même manière, par l'observation de la co-occurrence d'événements perceptibles dans plusieurs objets de la scène ou la détection de motifs se répétant au cours des situations. Des travaux comme ceux de [Fallas-Moya & Torres-Rojas(2018)] cherchent déjà à dépasser la simple reconnaissance des objets par l'emploi de modèles telles que les mémoires hiérarchiques et temporelles (HTM), de [Hawkins & Blakeslee(2004)] dont l'ambition est de proposer une modélisation fidèle des structures corticales et de leurs processus, pour permettre à des algorithmes d'apprendre par l'observation dans un environnement complexe et structuré comme le ferait un humain. Cette dernière vision idéaliste ne représente guère plus qu'un mirage à l'horizon mais elle constitue pour moi une manière de «boucler la boucle» et retrouver, à travers l'idée de l'exploitation automatisée des structures cachées de l'environnement, l'essence des toutes premières réflexions de doctorant qui m'ont menées, quinze années plus tard, à la réalisation de ce mémoire.

Table des figures

2.1	Exemple d'ontologie de domaine au bloc opératoire	26
2.2	Représentation BPMN de l'activité collaborative	28
2.3	Modélisation d'un scénario comme une carte mentale	28
2.4	Diagramme en nœud papillon	29
2.5	Exemple de storyboard	31
2.6	Les 7 étapes de granularisation d'un scénario pédagogique	32
2.7	Méthodologie de la conception centrée sur la preuve	33
2.8	Le cadre conceptuel des niveaux d'interaction	35
2.9	Représentation de l'activité dans 3D-VOR et outil de validation	36
2.10	Graphes résultant de l'enregistrement de l'activité	38
3.1	Différents degrés d'intégration de l'utilisateur dans l'EV3D	43
3.2	Vue du formateur dans le prototype 3DVOR	47
3.3	Extrait de l'environnement sémantique de 3D-VOR	48
3.4	L'environnement hybride du projet Diag'Adventures	49
4.1	Continuum des interactions en EV3D	53
4.2	Réalité virtuelle non immersive	54
4.3	Dispositifs de réalité virtuelle immersive.	54
4.4	Immersion et collaboration dans un CAVE	55
4.5	Arc de téléportation dans un EV3D immersif	59
4.6	L'information représentée sous formes de bulles dans 3D-VOR	62
4.7	Métaphore de la main virtuelle versus lancer de rayon	63
4.8	Modifications contextuelles de la main virtuelle	64
4.9	Expérimentation autour des sensations haptiques	64
5.1	Illustration de STEVE, l'assistant virtuel	70
5.2	Le jeu "Façade" de Andrew Stern and Michael Mateas	71
5.3	Romains dans le forum virtuel de Roma Nova	76
5.4	L'assistant virtuel de Meca 3D	77
5.5	Graphe d'exploration des états dans 3D-VOR	78
6.1	Durée et variance des étapes du scénario de Meca 3D	86
6.2	Traces des personnages virtuels dans le projet Format-Store	87
6.3	Adaptation en temps réel de la difficulté dans Format-Store	87

Table des figures

7.1	L'architecture <i>Cortexionist</i>	90
7.2	Évacuation d'un bâtiment dans EGCERSIS	95

Bibliographie

- [Adam & Gaudou(2016)] Carole Adam & Benoit Gaudou. Bdi agents in social simulations : a survey. *The Knowledge Engineering Review* 31(3) :207–238 (2016).
- [Akiyoshi et al.(1995)] M Akiyoshi, S Miwa, T Ueda, & S Nishida. A learning environment for maintenance of power equipment using virtual reality. In *Image Processing and its Applications, 1995., Fifth International Conference on*, pp. 331–335. IET (1995).
- [Amokrane et al.(2008)] Kahina Amokrane, Domitile Lourdeaux, & Jean-Marie Burkhardt. Hera : Learner tracking in a virtual environment. *IJVR* 7(3) :23–30 (2008).
- [Anderson et al.(2010)] Eike Falk Anderson, Leigh McLoughlin, Fotis Liarokapis, Christopher Peters, Panagiotis Petridis, & Sara de Freitas. Developing serious games for cultural heritage : a state-of-the-art review. *Virtual Reality* 14(4) :255–275 (2010).
- [Annett & Duncan(1967)] John Annett & Keith D Duncan. Task analysis and training design. *Occupational Psychology* 41 :211—221 (1967).
- [Argelaguet & Andujar(2009)] Ferran Argelaguet & Carlos Andujar. Efficient 3d pointing selection in cluttered virtual environments. *IEEE Computer Graphics and Applications* 29(6) :34–43 (2009).
- [Assali et al.(2009)] Amjad Abou Assali, Dominique Lenne, Bruno Debray, & Sébastien Bouchet. Cobra : Une plate-forme de rāpc basée sur des ontologies. In *IC 2009*, pp. 277–288 (2009).
- [Aubry(2007)] Stéphane Aubry. *Annotations et gestion des connaissances en environnement virtuel collaboratif*. Ph.D. thesis, Compiègne. Thèse de doctorat dirigée par Lenne, Dominique et Thouvenin, Indira Technologies de l’information et des systèmes Compiègne 2007 (2007).
- [Auvray & Fuchs(2007)] Malika Auvray & Philippe Fuchs. Perception, immersion et interaction sensorimotrices en environnement virtuel. *Réalité Virtuelle et Cognition. Numéro spécial de Intellectica* 45(1) :23–35 (2007).
- [Ayodeji et al.(2007)] ID Ayodeji, M Schijven, J Jakimowicz, & JW Greve. Face validation of the simionix lap mentor virtual reality training module and its applicability in the surgical curriculum. *Surgical endoscopy* 21(9) :1641–1649 (2007).
- [Barot(2014)] Camille Barot. *Scénarisation d’environnements virtuels. Vers un équilibre entre contrôle, cohérence et adaptabilité*. Ph.D. thesis (2014).
- [Barot et al.(2013)] Camille Barot, Domitile Lourdeaux, J-M Burkhardt, Kahina Amokrane, & Dominique Lenne. V3s : A virtual environment for risk-management training

- based on human-activity models. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments* 22(1) :1–19 (2013).
- [Baudouin et al.(2007)] Cyrille Baudouin, Michel Beney, Pierre Chevaillier, & Agnès Le Pallec. Recueil de traces pour le suivi de l’activité d’apprenants en travaux pratiques dans un environnement de réalité virtuelle. *Sciences et Technologies de l’Information et de la Communication pour l’Éducation et la Formation* 14(1) :389–418 (2007).
- [Black & Wiliam(1998)] Paul Black & Dylan Wiliam. Assessment and classroom learning. *Assessment in Education : principles, policy & practice* 5(1) :7–74 (1998).
- [Bloom(1971)] Benjamin S Bloom. *Handbook on formative and summative evaluation of student learning*. McGraw (1971).
- [Borovikov et al.(2019)] Igor Borovikov, Jesse Harder, Michael Sadosky, & Ahmad Beirami. Towards interactive training of non-player characters in video games. *arXiv preprint arXiv :1906.00535* (2019).
- [Bossard et al.(2008)] Cyril Bossard, Gilles Kermarrec, Cédric Buche, & Jacques Tisseau. Transfer of learning in virtual environments : a new challenge? *Virtual Reality* 12(3) :151–161 (2008).
- [Bouvier et al.(2013a)] Patrice Bouvier, Elise Lavoué, Karim Sehaba, & Sébastien George. Identifying learner’s engagement in learning games : A qualitative approach based on learner’s traces of interaction (2013a).
- [Bouvier et al.(2013b)] Patrice Bouvier, Karim Sehaba, Elise Lavoué, & Sébastien George. Using traces to qualify learner’s engagement in game-based learning. In *Advanced Learning Technologies (ICALT), 2013 IEEE 13th International Conference on*, pp. 432–436. IEEE (2013b).
- [Bouville et al.(2015)] Rozenn Bouville, Valérie Gouranton, Thomas Boggini, Florian Nouviale, & Bruno Arnaldi. # five : High-level components for developing collaborative and interactive virtual environments. In *Software Engineering and Architectures for Realtime Interactive Systems (SEARIS), 2015 IEEE 8th Workshop on*, pp. 33–40. IEEE (2015).
- [Bowman et al.(2004)] Doug Bowman, Ernst Kruijff, Joseph J LaViola Jr, & Ivan P Poupyrev. *3D User interfaces : theory and practice, CourseSmart eTextbook*. Addison-Wesley (2004).
- [Bowman et al.(1999)] Doug A Bowman, Larry F Hodges, Don Allison, & Jean Wine-man. The educational value of an information-rich virtual environment. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments* 8(3) :317–331 (1999).
- [Bowman et al.(1997)] Doug A Bowman, David Koller, & 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*, pp. 45–52. IEEE (1997).
- [Bowman(1999)] Douglas A Bowman. Interaction techniques for common tasks in immersive virtual environments. *Georgia Institute of Technology* (1999).
- [Bradley(2006)] Paul Bradley. The history of simulation in medical education and possible future directions. *Medical education* 40(3) :254–262 (2006).

-
- [Brooke et al.(1996)] John Brooke et al. Sus-a quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry* 189(194) :4–7 (1996).
- [Brown & Cairns(2004)] Emily Brown & Paul Cairns. A grounded investigation of game immersion. In *CHI'04 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 1297–1300. ACM (2004).
- [Brown et al.(1989)] John Seely Brown, Allan Collins, & Paul Duguid. Situated cognition and the culture of learning. *Educational researcher* 18(1) :32–42 (1989).
- [Buche et al.(2006)] Cédric Buche, Ronan Querrec, Pierre Chevaillier, & Gilles Kermarrec. Apports des systèmes tutoriaux intelligents et de la réalité virtuelle à l'apprentissage de compétences. (2006).
- [Buche et al.(2004)] Cédric Buche, Ronan Querrec, Pierre De Loor, & Pierre Chevaillier. Mascaret : A pedagogical multi-agent system for virtual environments for training. *International Journal of Distance Education Technologies (IJDET)* 2(4) :41–61 (2004).
- [Burkhardt et al.(2005)] Jean-marie Burkhardt, Domitile Lourdeaux, & Flore Lequatre. Environnements virtuels pour l'apprentissage : de l'image d'épinal à la réalité des usages et des configurations socio-techniques. In *Proceedings of the 17th Conference on l'Interaction Homme-Machine*, pp. 163–170. ACM (2005).
- [Cadez et al.(2000)] Igor Cadez, David Heckerman, Christopher Meek, Padhraic Smyth, & Steven White. Visualization of navigation patterns on a web site using model-based clustering. In *Proceedings of the sixth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*, pp. 280–284. ACM (2000).
- [Caillaud(2013)] Benoît Caillaud. Surgical process mining with test and flip net synthesis. In *Application of Region Theory (ART)*, pp. 43–54 (2013).
- [Callies(2016)] Sophie Callies. *Architecture de génération automatique de scénarios pédagogiques de jeux sérieux éducatifs*. Ph.D. thesis, Université du Québec à Montréal (2016).
- [Camus(2010)] Fabrice Camus. *Conception d'environnements virtuels dédiés à la maîtrise des risques : l'approche MELISSA*. Ph.D. thesis, Compiègne. Thèse de doctorat dirigée par Lenne, Dominique et Le Cardinal, Gilles Technologies de l'information et des systèmes Compiègne 2010 (2010).
- [Cao et al.(2018)] Zekun Cao, Jason Jerald, & Regis Kopper. Visually-induced motion sickness reduction via static and dynamic rest frames. In *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 105–112. IEEE (2018).
- [Cardin(2016)] Yohann Cardin. *L'analyse de l'activité comme préalable à la conception d'un environnement virtuel de formation : le cas d'une formation à la gestion d'incendies en milieu urbain chez les sapeurs-pompiers*. Ph.D. thesis. Thèse de doctorat dirigée par Buche, Cédric Psychologie ergonomique Brest 2016 (2016).
- [Carpentier(2015)] Kévin Carpentier. *Dynamic personalized orchestration in virtual environment for training*. Theses, Université de Technologie de Compiègne (2015).
- [Cavazza et al.(2001)] Marc Cavazza, Fred Charles, & Steven J Mead. Characters in search of an author : Ai-based virtual storytelling. In *International Conference on Virtual Storytelling*, pp. 145–154. Springer (2001).

- [Chen(2001)] Jenova Chen. *Flow in games*. Ph.D. thesis, PhD thesis, University of Southern California (2001).
- [Chevaillier(2006)] Pierre Chevaillier. Les systèmes multi-agents pour les environnements virtuels de formation. *Habilitation à diriger des recherches, Université de Bretagne Occidentale, Brest* 31 (2006).
- [Chevaillier et al.(2012)] Pierre Chevaillier, Thanh-Hai Trinh, Mukesh Barange, Pierre De Loor, Frédéric Devillers, Julien Soler, & Ronan Querrec. Semantic modeling of virtual environments using mascaret. In *Software Engineering and Architectures for Realtime Interactive Systems (SEARIS), 2012 5th Workshop on*, pp. 1–8. IEEE (2012).
- [Chollet(2015)] Mathieu Chollet. *Agents Conversationnels Animés pour l'entraînement social : modèle computationnel de l'expression d'attitudes sociales par des séquences de signaux non-verbaux*. Ph.D. thesis (2015).
- [Chou(2015)] Yu-Kai Chou. Octalysis : Complete gamification framework. *Acesso em* 22 (2015).
- [Claude(2016)] Guillaume Claude. *Séquencement d'actions en environnement virtuel collaboratif*. Ph.D. thesis, Rennes, INSA (2016).
- [Coquillart et al.(2003)] Sabine Coquillart, Jérôme Grosjean, & Alexis Paljic. Interaction 3D : Paradigmes et métaphores. In Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris (ed.), *Traité de la Réalité Virtuelle* (2003).
- [Couix & Burkhardt(2011)] Stanislas Couix & Jean-Marie Burkhardt. Task descriptions using academic oriented modelling languages : a survey of actual practices across the sigchi community. In *IFIP Conference on Human-Computer Interaction*, pp. 555–570. Springer (2011).
- [Crandall et al.(2006)] Beth Crandall, Gary Klein, Gary A Klein, & Robert R Hoffman. *Working minds : A practitioner's guide to cognitive task analysis*. Mit Press (2006).
- [Crawford(2012)] Chris Crawford. *Chris Crawford on interactive storytelling*. New Riders (2012).
- [Crookall(2010)] David Crookall. Serious games, debriefing, and simulation/gaming as a discipline. *Simulation & gaming* 41(6) :898–920 (2010).
- [Cruz-Neira et al.(1992)] Carolina Cruz-Neira, Daniel J Sandin, Thomas A DeFanti, Robert V Kenyon, & John C Hart. The cave : audio visual experience automatic virtual environment. *Communications of the ACM* 35(6) :64–73 (1992).
- [Csikszentmihalyi(1997)] Mihaly Csikszentmihalyi. Flow and the psychology of discovery and invention. *HarperPerennial, New York* 39 (1997).
- [Da Dalto(2004)] Laurent Da Dalto. *CS WAVE : la réalité virtuelle pour la formation au soudage*. Ed. Techniques Ingénieur (2004).
- [Dawley & Dede(2014)] Lisa Dawley & Chris Dede. Situated learning in virtual worlds and immersive simulations. In *Handbook of research on educational communications and technology*, pp. 723–734. Springer (2014).

-
- [de Melo et al.(2012)] Celso M de Melo, Peter Carnevale, & Jonathan Gratch. The effect of virtual agents' emotion displays and appraisals on people's decision making in negotiation. In *International Conference on Intelligent Virtual Agents*, pp. 53–66. Springer (2012).
- [De Troyer et al.(2017)] Olga De Troyer, Frederik Van Broeckhoven, & Joachim Vlieghe. *Creating Story-Based Serious Games Using a Controlled Natural Language Domain Specific Modeling Language*, pp. 567–603. Springer International Publishing, Cham (2017).
- [Deci & Ryan(1980)] Edward L Deci & Richard M Ryan. Self-determination theory : When mind mediates behavior. *The Journal of mind and Behavior* pp. 33–43 (1980).
- [Deci & Ryan(2000)] Edward L Deci & Richard M Ryan. The " what " and " why " of goal pursuits : Human needs and the self-determination of behavior. *Psychological inquiry* 11(4) :227–268 (2000).
- [Dede et al.(1996)] Chris Dede, Marilyn C. Salzman, & R. Bowen Loftin. Maxwellworld : Learning complex scientific concepts via immersion in virtual reality. In *Proceedings of the 1996 International Conference on Learning Sciences*, ICLS '96, pp. 22–29 (1996).
- [Delmas et al.(2007)] Guylain Delmas, Ronan Champagnat, & Michel Augeraud. Plot monitoring for interactive narrative games. In *Proceedings of the international conference on Advances in computer entertainment technology*, pp. 17–20. ACM (2007).
- [Deng et al.(2014)] Ying Deng, Alissa N Antle, & Carman Neustaedter. Tango cards : a card-based design tool for informing the design of tangible learning games. In *Proceedings of the 2014 conference on Designing interactive systems*, pp. 695–704. ACM (2014).
- [Desmoulins & Grandbastien(2006)] C Desmoulins & M Grandbastien. Une ingénierie des eiahs fondée sur des ontologies. *Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain* pp. 161–180 (2006).
- [Domingues(2010)] Christophe Domingues. *Interaction 3D collaborative en réalité virtuelle*. Ph.D. thesis (2010).
- [Donikian(2004)] Stéphane Donikian. Modélisation, contrôle et animation d'agents virtuels autonomes évoluant dans des environnements informés et structurés. *Hdr, IRISA* (2004).
- [Drachen & Canossa(2011)] Anders Drachen & Alessandro Canossa. Evaluating motion : Spatial user behaviour in virtual environments. *International Journal of Arts and Technology* 4(3) :294–314 (2011).
- [Drachen et al.(2014)] Anders Drachen, Christian Thureau, Rafet Sifa, & Christian Bauckhage. A comparison of methods for player clustering via behavioral telemetry. In *Proceedings of the 8th International Conference on the Foundations of Digital Games*, pp. 245–252, Crete, Greece (2014).
- [Duval(2012)] Thierry Duval. *Models for design, implementation and deployment of 3D Collaborative Virtual Environments*. Ph.D. thesis (2012).
- [Duval(2017)] Yohan Duval. *Création automatisée de Scénarios de Formation pour l'enseignement d'activités métier dans un environnement informatique modulaire*. Ph.D. thesis, Université de Toulouse (2017).

- [Duval et al.(2015)] Yohan Duval, David Panzoli, Axel Reymonet, Jean-Yves Plantec, Jérôme Thomas, & Jean-Pierre Jessel. Serious games scenario modeling for non-experts. In *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Supported Education-Volume 1*, pp. 474–479. SCITEPRESS-Science and Technology Publications, Lda (2015).
- [Duval et al.(2016)] Yohan Duval, Axel Reymonet, Jérôme Thomas, David Panzoli, Jean-Yves Plantec, & Jean-Pierre Jessel. Automated and assisted authoring of serious game scenarios. In *International Conference on Interactive Collaborative Learning*, pp. 547–554. Springer (2016).
- [Edward et al.(2009)] Lydie Edward, Domitile Lourdeaux, & Jean-Paul Barthès. Virtual autonomous agents in an informed environment for risk prevention. In *International Workshop on Intelligent Virtual Agents*, pp. 496–497. Springer (2009).
- [Edward et al.(2008)] Lydie Edward, Domitile Lourdeaux, Jean-Paul A Barthès, Dominique Lenne, & Jean-Marie Burkhardt. Modelling autonomous virtual agent behaviours in a virtual environment for risk. *IJVR* 7(3) :13–22 (2008).
- [El-Kechaï & Després(2007)] Naïma El-Kechaï & Christophe Després. Rechercher les causes des actions erronées du formé pour les proposer au formateur. In *Actes de la conférence EIAH 2007*. INRP (2007).
- [El-Kechaï et al.(2015)] Naïma El-Kechaï, Mathieu Muratet, Amel Yessad, & Jean-Marc Labat. Le suivi de l'apprenant : une approche fondée sur le cadre méthodologique evidence centered design application aux serious games. In *EIAH 2015-Atelier Evaluation des Apprentissages et Environnements Informatique* (2015).
- [Engström & Östblad(2018)] Henrik Engström & Per Anders Östblad. Using text-to-speech to prototype game dialog. *Computers in Entertainment (CIE)* 16(4) :1–16 (2018).
- [Ermi & Mäyrä(2005)] Laura Ermi & Frans Mäyrä. Fundamental components of the gameplay experience : Analysing immersion. *Worlds in play : International perspectives on digital games research* 37(2) :37–53 (2005).
- [Fabre et al.(2006)] D Fabre, S Couix, JM Burkhardt, C Gounelle, & P Cabon. Virtual reality to support human factors for safety : where we are and where we (aim to) go. In *Esrel-safety and reliability annual conference* (2006).
- [Fallas-Moya & Torres-Rojas(2018)] Fabián Fallas-Moya & Francisco Torres-Rojas. Object recognition using hierarchical temporal memory. In *International Symposium on Intelligent Computing Systems*, pp. 1–14. Springer (2018).
- [Falloon(2019)] Garry Falloon. Using simulations to teach young students science concepts : An experiential learning theoretical analysis. *Computers & Education* 135 :138–159 (2019).
- [Farenc et al.(1999)] Nathalie Farenc, Ronan Boulic, & Daniel Thalmann. An informed environment dedicated to the simulation of virtual humans in urban context. In *Computer Graphics Forum*, vol. 18, pp. 309–318. Wiley Online Library (1999).
- [Fenouillet et al.(2009)] Fabien Fenouillet, Jonathan Kaplan, & Nora Yennek. Serious games et motivation. In *4eme Conference francophone sur les Environnements Infor-*

-
- matiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH'09), vol. Actes de l'Atelier "Jeux Sérioux : conception et usages* (2009).
- [Fernandes & Feiner(2016)] Ajoy S Fernandes & Steven K Feiner. Combating vr sickness through subtle dynamic field-of-view modification. In *2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 201–210. IEEE (2016).
- [Fernández-Gallego et al.(2013)] Beatriz Fernández-Gallego, Manuel Lama, Juan C Vidal, & Manuel Mucientes. Learning analytics framework for educational virtual worlds. *Procedia Computer Science* 25 :443–447 (2013).
- [Figuroa et al.(2008)] Pablo Figuroa, Walter F Bischof, Pierre Boulanger, H James Hoover, & Robyn Taylor. Intml : A dataflow oriented development system for virtual reality applications. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments* 17(5) :492–511 (2008).
- [Fovet et al.(2016)] T Fovet, J-A Micoulaud-Franchi, G Vaiva, P Thomas, R Jardri, & A Amad. Le serious game : applications thérapeutiques en psychiatrie. *L'Encéphale* 42(5) :463–469 (2016).
- [Freeman et al.(2014)] Daniel Freeman, Nicole Evans, Rachel Lister, Angus Antley, Graham Dunn, & Mel Slater. Height, social comparison, and paranoia : an immersive virtual reality experimental study. *Psychiatry Research* 218(3) :348–352 (2014).
- [Freina & Ott(2015)] Laura Freina & Michela Ott. A literature review on immersive virtual reality in education : State of the art and perspectives. In *eLearning and Software for Education (eLSE)*, Bucharest (Romania) (2015).
- [Fuchs et al.(2003)] Philippe Fuchs, Guillaume Moreau, & Alain Berthoz. Le traité de la réalité virtuelle(vol. 1, fondements et interfaces comportementales). *Sciences mathématiques et informatique* (2003).
- [Fuchs et al.(2006)] Philippe Fuchs, Guillaume Moreau, & Jean-Marie Burkhardt. Le traité de la réalité virtuelle volume 2-l'interfaçage : l'immersion et l'interaction en environnement virtuel (2006).
- [Fuchs et al.(2002)] Philippe Fuchs, Fawzi Nashashibi, & Domitile Lourdeaux. Three levels of immersion and interaction in a approach of the vr design. *International Journal of design and Innovation Research* 2(1) :pp-30 (2002).
- [Galaup(2013)] Michel Galaup. *De la conception à l'usage d'un jeu sérieux de génie mécanique : phénomènes de transposition didactique dans l'enseignement secondaire et universitaire : le cas de Mecagenius®*. Ph.D. thesis, Université Toulouse le Mirail-Toulouse II (2013).
- [Galaup(2020)] Michel Galaup. *Phénomènes transpositifs et environnements numériques pour l'apprentissage*. Ph.D. thesis, Habilitation à diriger des recherches en Sciences de l'Éducation, Université Toulouse 2 - Jean Jaurès (2020).
- [Galaup et al.(2017)] Michel Galaup, Nicolas Muller, Catherine Lelardeux, David Panzoli, Jean-Pierre Jessel, & Pierre Lagarrigue. Design of learning environments for mechanical engineering. *Procedia Manufacturing* 13 :1440–1446 (2017).
- [Galaup et al.(2015)] Michel Galaup, Frédéric Segonds, Catherine Lelardeux, & Pierre Lagarrigue. Mecagenius : An innovative learning game for mechanical engineering. (2015).

- [Gee(2003)] James Paul Gee. What video games have to teach us about learning and literacy. *Computers in Entertainment (CIE)* 1(1) :20–20 (2003).
- [Georgiadis et al.(2018)] Konstantinos Georgiadis, Giel van Lankveld, Kiavash Bahreini, & Wim Westera. Accommodating stealth assessment in serious games : Towards developing a generic tool. In *2018 10th International Conference on Virtual Worlds and Games for Serious Applications (VS-Games)*, pp. 1–4. IEEE (2018).
- [Gerbaud et al.(2007)] Stéphanie Gerbaud, Nicolas Mollet, & Bruno Arnaldi. *Virtual Environments for Training : From Individual Learning to Collaboration with Humanoids*, pp. 116–127. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg (2007).
- [Gerbaud et al.(2008)] Stéphanie Gerbaud, Nicolas Mollet, Franck Ganier, Bruno Arnaldi, & Jacques Tisseau. Gvt : a platform to create virtual environments for procedural training. In *2008 IEEE Virtual Reality Conference*, pp. 225–232. IEEE (2008).
- [Gibson(1979)] James J Gibson. The theory of affordances. the ecological approach to visual perception (1979).
- [Gilibert & Gillet(2010)] Daniel Gilibert & Isabelle Gillet. Revue des modèles en évaluation de formation : approches conceptuelles individuelles et sociales. *Pratiques psychologiques* 16(3) :217–238 (2010).
- [Grassi(2000)] Charles R Grassi. *A task analysis of pier side ship-handling for virtual environment ship-handling simulator scenario development*. Ph.D. thesis, Monterey, California. Naval Postgraduate School (2000).
- [Guardiola(2014)] Emmanuel Guardiola. *Méthode de game design pour la création d'un profil psychologique du joueur*. Ph.D. thesis, Conservatoire national des arts et métiers-CNAM (2014).
- [Guay et al.(2000)] Frédéric Guay, Robert J Vallerand, & Céline Blanchard. On the assessment of situational intrinsic and extrinsic motivation : The situational motivation scale (sims). *Motivation and emotion* 24(3) :175–213 (2000).
- [Hachisu et al.(2011)] Taku Hachisu, Gabriel Cirio, Maud Marchal, Anatole Lécuyer, & Hiroyuki Kajimoto. Pseudo-haptic feedback augmented with visual and tactile vibrations. In *2011 IEEE International Symposium on VR Innovation*, pp. 327–328. IEEE (2011).
- [Hawkins & Blakeslee(2004)] Jeff Hawkins & Sandra Blakeslee. *On intelligence*. Macmillan (2004).
- [Heutte(2020)] Jean Heutte. L'expérience autotélique avec les technologies : Ne pas oublier le dark side of flow (le côté obscur du flow). In *8e rencontre Jeunes Chercheurs en EIAH (RJC-EIAH 2020)* (2020).
- [Hoareau et al.(2017)] Charlotte Hoareau, Ronan Querrec, Cédric Buche, & Franck Ganier. Evaluation of internal and external validity of a virtual environment for learning a long procedure. *International Journal of Human-Computer Interaction* 33(10) :786–798 (2017).
- [Hollnagel(2017)] Erik Hollnagel. *FRAM : the functional resonance analysis method : modelling complex socio-technical systems*. CRC Press (2017).

-
- [Hudlicka(2016)] Eva Hudlicka. Virtual affective agents and therapeutic games. In *artificial intelligence in behavioral and mental health care*, pp. 81–115. Elsevier (2016).
- [Ijsselsteijn et al.(2013)] Wijnand A. Ijsselsteijn, Yvonne De Kort, & Karolien Poels. The game experience questionnaire. *Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven* (2013).
- [Interactive(2012)] GENIOUS Interactive. Voracy fish : New multiplayer serious game for physical rehabilitation (2012) (2012).
- [Jackson & Csikszentmihalyi(1999)] Susan A Jackson & Mihaly Csikszentmihalyi. *Flow in sports*. Human Kinetics (1999).
- [Jacobson & Vadnal(2005)] Jeffrey Jacobson & Jane Vadnal. The virtual pompeii project. In *Proceedings of World Conference on E-Learning in Corporate, Government, Healthcare, and Higher Education*, pp. 1644–1649 (2005).
- [Jankowski & Hachet(2013)] Jacek Jankowski & Martin Hachet. A survey of interaction techniques for interactive 3d environments (2013).
- [Jankowski & Hachet(2015)] Jacek Jankowski & Martin Hachet. Advances in interaction with 3d environments. *Computer Graphics Forum* 34(1) :152–190 (2015).
- [Jeanne et al.(2017)] Florian Jeanne, Yann Soullard, Ali Oker, & Indira Thouvenin. Ebagg : Error-based assistance for gesture guidance in virtual environments. In *Advanced Learning Technologies (ICALT), 2017 IEEE 17th International Conference on*, pp. 472–476. IEEE (2017).
- [Jeanne & Thouvenin(2015)] Florian Jeanne & Indira Thouvenin. Kiva : environnement virtuel informé pour la formation au geste technique (2015).
- [Jennett et al.(2008)] Charlene Jennett, Anna L Cox, Paul Cairns, Samira Dhoparee, Andrew Epps, Tim Tijs, & Alison Walton. Measuring and defining the experience of immersion in games. *International journal of human-computer studies* 66(9) :641–661 (2008).
- [Johnson & Rickel(1997)] W. Johnson & Jeff Rickel. Steve : An animated pedagogical agent for procedural training in virtual environments. *SIGART Bulletin* 8 :16–21 (1997).
- [Jonassen(1994)] David H Jonassen. Thinking technology : Toward a constructivist design model. *Educational technology* 34(4) :34–37 (1994).
- [Kallmann & Thalmann(1999)] Marcelo Kallmann & Daniel Thalmann. Modeling objects for interaction tasks. In *Computer Animation and Simulation'98*, pp. 73–86. Springer (1999).
- [Keller(2000)] John M Keller. How to integrate learner motivation planning into lesson planning : The arcs model approach. *VII Semanario, Santiago, Cuba* pp. 1–13 (2000).
- [Kemeny et al.(2017)] Andras Kemeny, Paul George, Frédéric Mérienne, & Florent Colombet. New vr navigation techniques to reduce cybersickness. *Electronic Imaging* 2017(3) :48–53 (2017).
- [Kerous et al.(2018)] Bojan Kerous, Filip Skola, & Fotis Liarokapis. Eeg-based bci and video games : a progress report. *Virtual Reality* 22(2) :119–135 (2018).
- [Kim et al.(2008)] Jun H Kim, Daniel V Gunn, Eric Schuh, Bruce Phillips, Randy J Pagulayan, & Dennis Wixon. Tracking real-time user experience (true) : a comprehensive

- instrumentation solution for complex systems. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 443–452. ACM (2008).
- [Knight & Tlauka(2017)] Matthew James Knight & Michael Tlauka. Interactivity in map learning : The effect of cognitive load. *Spatial Cognition & Computation* 17(3) :185–198 (2017).
- [Kolb(1984)] D. A. Kolb. *Experiential Learning : experience as the source of learning and development*. Prentice-Hall, New Jersey (1984).
- [Koper et al.(2003)] Rob Koper, Bill Olivier, & Thor Anderson. Ims learning design information model. *IMS Global Learning Consortium* (2003).
- [Kourtesis et al.(2019)] Panagiotis Kourtesis, Simona Collina, Leonidas Adam Alexander Doulas, & Sarah E MacPherson. Validation of the virtual reality neuroscience questionnaire : Maximum duration of immersive virtual reality sessions without the presence of pertinent adverse symptomatology. *Frontiers in Human Neuroscience* 13 :417 (2019).
- [Kozak et al.(1993)] JJ Kozak, PA Hancock, EJ Arthur, & ST Chrysler. Transfer of training from virtual reality. *Ergonomics* 36(7) :777–784 (1993).
- [Kubera et al.(2008)] Yoann Kubera, Philippe Mathieu, Sébastien Picault, et al. Interaction-oriented agent simulations : From theory to implementation. In *ECAI*, pp. 383–387 (2008).
- [Laird et al.(1987)] John E Laird, Allen Newell, & Paul S Rosenbloom. Soar : An architecture for general intelligence. *Artificial intelligence* 33(1) :1–64 (1987).
- [Lallemant et al.(2015)] C. Lallemant, V. Koenig, G. Gronier, & R. Martin. Création et validation d’une version française du questionnaire attrakdiff pour l’évaluation de l’expérience utilisateur des systèmes interactifs. *Revue Européenne de Psychologie Appliquée/European Review of Applied Psychology* 65(5) :239 – 252 (2015).
- [Lane & Wray(2012)] H Chad Lane & Robert E Wray. Individualized cultural and social skills learning with virtual humans. In *Adaptive technologies for training and education*, pp. 204–221. Cambridge University Press (2012).
- [Langbehn et al.(2018)] Eike Langbehn, Frank Steinicke, Markus Lappe, Gregory F. Welch, & Gerd Bruder. In the blink of an eye : leveraging blink-induced suppression for imperceptible position and orientation redirection in virtual reality. *ACM Trans. Graph.* 37(4) :66 :1–66 :11 (2018).
- [Lanier(2017)] Jaron Lanier. *Dawn of the new everything : A journey through virtual reality*. Random House (2017).
- [Lave & Wenger(1991)] Jean Lave & Etienne Wenger. *Situated learning : Legitimate peripheral participation*. Cambridge university press (1991).
- [Lazzaro(2004)] Nicole Lazzaro. Why We Play Games : Four Keys to More Emotion Without Story. In *Game Developers Conference* (2004).
- [Le Cardinal(1992)] Gilles Le Cardinal. Présentation de la méthode PAT-miroir. <http://www.utc.fr/webpat/presentat.html> (1992).
- [Lecouvey et al.(2012)] Grégory Lecouvey, Julie Gonneaud, Francis Eustache, & Béatrice Desgranges. Les apports de la réalité virtuelle en neuropsychologie : l’exemple de la mémoire prospective. *Revue de neuropsychologie* 4(4) :267–276 (2012).

-
- [Lécuyer et al.(2020)] Flavien Lécuyer, Valérie Gouranton, Adrien Reuzeau, Ronan Gagne, & Bruno Arnaldi. Action sequencing in vr, a no-code approach. In *Transactions on Computational Science XXXVII*, pp. 57–76. Springer (2020).
- [Lelardeux et al.(2016)] Catherine Pons Lelardeux, David Panzoli, Pierre Lagarrigue, & Jean-Pierre Jessel. Making decisions in a virtual operating room. In *2016 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS)*, pp. 136–142. IEEE (2016).
- [Lelardeux et al.(2017)] Catherine Pons Lelardeux, David Panzoli, Vincent Lubrano, Vincent Minville, Pierre Lagarrigue, & Jean-Pierre Jessel. Communication system and team situation awareness in a multiplayer real-time learning environment : application to a virtual operating room. *The Visual Computer* 33(4) :489–515 (2017).
- [Lenne(2009)] Dominique Lenne. *Modélisation des connaissances et de l'interaction, application aux environnements informatiques pour l'Apprentissage humain*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Technologie de Compiègne (2009).
- [Leroy et al.(2012)] Laure Leroy, Philippe Fuchs, & Guillaume Moreau. Real-time adaptive blur for reducing eye strain in stereoscopic displays. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)* 9(2) :9 (2012).
- [Lester et al.(2011)] James C Lester, Scott W McQuiggan, & Jennifer L Sabourin. Affect recognition and expression in narrative-centered learning environments. In *New perspectives on affect and learning technologies*, pp. 85–96. Springer (2011).
- [Lewis(1995)] James R. Lewis. Ibm computer usability satisfaction questionnaires : Psychometric evaluation and instructions for use. *Int. J. Hum.-Comput. Interact.* 7(1) :57–78 (1995).
- [Liarokapis et al.(2014)] Fotis Liarokapis, Kurt Debattista, Athanasios Vourvopoulos, Panagiotis Petridis, & Alina Ene. Comparing interaction techniques for serious games through brain-computer interfaces : A user perception evaluation study. *Entertainment Computing* 5(4) :391–399 (2014).
- [Liew et al.(2017)] Tze Wei Liew, Nor Azan Mat Zin, & Noraidah Sahari. Exploring the affective, motivational and cognitive effects of pedagogical agent enthusiasm in a multimedia learning environment. *Human-centric Computing and Information Sciences* 7(1) :9 (2017).
- [Loftin et al.(1994)] R Bowen Loftin, Patrick J Kenney, Robin Benedetti, Chris Culbert, Mark Engelberg, Robert Jones, Paige Lucas, Mason Menninger, John Muratore, Lac Nguyen, et al. Virtual environments in training : Nasa's hubble space telescope mission. In *Interservice/industry training systems & education conference*, pp. 1–10 (1994).
- [Loh(2012)] Christian S. Loh. *Information Trails : In-Process Assessment of Game-Based Learning*, pp. 123–144. Springer New York, New York, NY (2012).
- [Loh & Sheng(2015a)] Christian Sebastian Loh & Yanyan Sheng. Measuring expert performance for serious games analytics : From data to insights. In *Serious Games Analytics*, pp. 101–134. Springer (2015a).
- [Loh & Sheng(2015b)] Christian Sebastian Loh & Yanyan Sheng. Measuring the (dis-)similarity between expert and novice behaviors as serious games analytics. *Education and Information Technologies* 20(1) :5–19 (2015b).

- [Loh et al.(2015)] Christian Sebastian Loh, Yanyan Sheng, & Dirk Ifenthaler. *Serious Games Analytics : Theoretical Framework*, pp. 3–29. Springer International Publishing, Cham (2015).
- [Lopez et al.(2014)] Thomas Lopez, Pierre Chevaillier, Valérie Gouranton, Paul Evrard, Florian Nouviale, Mukesh Barange, Rozenn Bouville, & Bruno Arnaldi. Collaborative virtual training with physical and communicative autonomous agents. *Computer Animation and Virtual Worlds* 25(3-4) :485–493 (2014).
- [Loup(2017)] Guillaume Loup. *Conception et développement d'interactions immersives pour jeux sérieux*. Ph.D. thesis, IUT de Laval, Laval, France (2017).
- [Lourdeaux(2001)] Domitile Lourdeaux. *Réalité virtuelle et formation : conception d'environnements virtuels pédagogiques*. Ph.D. thesis, Paris, ENMP. Thèse de doctorat dirigée par Fuchs, Philippe Sciences appliquées. Informatique, automatique théorique, systèmes Paris, ENMP 2001 (2001).
- [Lourdeaux et al.(2019)] Domitile Lourdeaux, Zoubida Afoutni, Marie-Hélène Ferrer, Nicolas Sabouret, Virginie Demulier, Jean-Claude Martin, Laurence Bolot, Vincent Boccara, & Romain Lelong. Victeams : a virtual environment to train medical team leaders to interact with virtual subordinates. In *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Intelligent Virtual Agents*, pp. 241–243 (2019).
- [Luebke et al.(2002)] David Luebke, Benjamin Watson, Jonathan D. Cohen, Martin Reddy, & Amitabh Varshney. *Level of Detail for 3D Graphics*. Elsevier Science Inc., New York, NY, USA (2002).
- [Maïm et al.(2007)] Jonathan Maïm, Simon Haegler, Barbara Yersin, Pascal Mueller, Daniel Thalmann, & Luc Van Gool. Populating ancient pompeii with crowds of virtual romans. In *Proceedings of the 8th International Symposium on Virtual Reality, Archeology and Cultural Heritage-VAST*, pp. 109–116 (2007).
- [Malone(1980)] Thomas W Malone. What makes things fun to learn ? heuristics for designing instructional computer games. In *Proceedings of the 3rd ACM SIGSMALL symposium and the first SIGPC symposium on Small systems*, pp. 162–169. ACM (1980).
- [Malone(1987)] Thomas W Malone. Making learning fun : A taxonomic model of intrinsic motivations for learning. *Cognitive and affective process analysis* (1987).
- [Marfisi-Schottman et al.(2010)] Iza Marfisi-Schottman, Sébastien George, & Franck Tarpin-Bernard. Tools and methods for efficiently designing serious games. In *Proceedings of the 4th European Conference on Games Based Learning ECGBL*, pp. 226–234 (2010).
- [Marion(2010)] Nicolas Marion. *Modélisation de scénarios pédagogiques pour les environnements de réalité virtuelle d'apprentissage humain*. Ph.D. thesis. Thèse de doctorat dirigée par Chevaillier, Pierre Informatique Brest 2010 (2010).
- [Marne & Labat(2014)] Bertrand Marne & Jean-Marc Labat. Model and authoring tool to help teachers adapt serious games to their educational contexts. *International Journal of Learning Technology* 9(2) :161–180 (2014).
- [Martinais(2011)] E Martinais. Les fonctions sociales et politiques de l'étude de dangers dans le domaine des risques industriels. *géocarrefour*, 85 (4) : 293–301 (2011).

-
- [Mateas & Stern(2002)] Michael Mateas & Andrew Stern. Towards integrating plot and character for interactive drama. In *Socially Intelligent Agents*, pp. 221–228. Springer (2002).
- [Mathieu et al.(2011a)] Philippe Mathieu, David Panzoli, & Sébastien Picault. Format-store : A multi-agent based approach to experiential learning. In Fotis Liarokapis (ed.), *Proceedings of the third International Conference on Games and Virtual Worlds for Serious Applications (VS-GAMES'11)*, pp. 120–127, Athens, Greece (2011a).
- [Mathieu et al.(2011b)] Philippe Mathieu, David Panzoli, & Sébastien Picault. Serious games et sma - application à un supermarché virtuel. In *19e Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA'11)*, pp. 181–190, Valenciennes, France (2011b).
- [Mathieu et al.(2012)] Philippe Mathieu, David Panzoli, & Sébastien Picault. Virtual customers in an agent world. In *10th international conference on Practical Application of Agent and Multi-Agent Systems (PAAMS'12)*, vol. 155, pp. 147–152, University of Salamanca, Spain (2012).
- [Mathieu et al.(2013)] Philippe Mathieu, David Panzoli, & Sébastien Picault. Virtual customers in a multiagent training application. In Zhigeng Pan, AdrianDavid Cheok, Wolfgang Müller, & Fotis Liarokapis (eds.), *Transactions on Edutainment IX*, vol. 7544 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 97–114. Springer Berlin Heidelberg (2013).
- [Matsumoto et al.(2019)] Keigo Matsumoto, Takuji Narumi, Yuki Ban, Yohei Yanase, Tomohiro Tanikawa, & Michitaka Hirose. Unlimited corridor : A visuo-haptic redirection system. In *The 17th International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry*, p. 18. ACM (2019).
- [Maturana et al.(1994)] Humberto R Maturana, Francisco J Varela, & François-Charles Jullien. *L'arbre de la connaissance*. Ed. Addison-Wesley France (1994).
- [Mendes et al.(2019)] Daniel Mendes, Fabio Marco Caputo, Andrea Giachetti, Alfredo Ferreira, & J Jorge. A survey on 3d virtual object manipulation : From the desktop to immersive virtual environments. In *Computer graphics forum*, vol. 38, pp. 21–45. Wiley Online Library (2019).
- [Merchant et al.(2014)] Zahira Merchant, Ernest T Goetz, Lauren Cifuentes, Wendy Keeney-Kennicutt, & Trina J Davis. Effectiveness of virtual reality-based instruction on students' learning outcomes in k-12 and higher education : A meta-analysis. *Computers & Education* 70 :29–40 (2014).
- [Min et al.(2015)] Wookhee Min, Megan H Frankosky, Bradford W Mott, Jonathan P Rowe, Eric Wiebe, Kristy Elizabeth Boyer, & James C Lester. Deepstealth : leveraging deep learning models for stealth assessment in game-based learning environments. In *International Conference on Artificial Intelligence in Education*, pp. 277–286. Springer (2015).
- [Mintz et al.(2001)] Rachel Mintz, Shai Litvak, & Yoav Yair. 3d-virtual reality in science education : An implication for astronomy teaching. *Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching* 20(3) :293–305 (2001).
- [Mislevy et al.(2003)] Robert J Mislevy, Linda S Steinberg, & Russell G Almond. Focus article : On the structure of educational assessments. *Measurement : Interdisciplinary research and perspectives* 1(1) :3–62 (2003).

- [Morehead et al.(2014)] Michael Morehead, Quinn Jones, Jared Blatt, Paul Holcomb, Juergen Schultz, Tom DeFanti, Mark Ellisman, Gianfranco Doretto, & George A Spiro. Poster : Braintrek-an immersive environment for investigating neuronal tissue. In *3D User Interfaces (3DUI), 2014 IEEE Symposium on*, pp. 157–158. IEEE (2014).
- [Moreno & Valdez(2005)] Roxana Moreno & Alfred Valdez. Cognitive load and learning effects of having students organize pictures and words in multimedia environments : The role of student interactivity and feedback. *Educational Technology Research and Development* 53(3) :35–45 (2005).
- [Muller(2019)] Nicolas Muller. *Métaphores d’interaction pour la formation dans des environnements virtuels immersif : application à Meca 3D*. Ph.D. thesis, Université de Toulouse (2019).
- [Muller et al.(2017)] Nicolas Muller, David Panzoli, Michel Galaup, Pierre Lagarrigue, & Jean-Pierre Jessel. Learning mechanical engineering in a virtual workshop : A preliminary study on utilisability, utility and acceptability. In *2017 9th international conference on virtual worlds and games for serious applications (VS-Games)*, pp. 55–62. IEEE (2017).
- [Munafo et al.(2017)] Justin Munafo, Meg Diedrick, & Thomas A Stoffregen. The virtual reality head-mounted display oculus rift induces motion sickness and is sexist in its effects. *Experimental brain research* 235(3) :889–901 (2017).
- [Ng et al.(2019)] Adrian KT Ng, Leith KY Chan, & Henry YK Lau. Effect of sensory conflict and postural instability on cybersickness. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 1860–1861. IEEE (2019).
- [Nguyen et al.(2014)] Thi Thuong Huyen Nguyen, Thierry Duval, & Charles Pontonnier. A new direct manipulation technique for immersive 3d virtual environments. In *ICAT-EGVE 2014 : the 24th International Conference on Artificial Reality and Telexistence and the 19th Eurographics Symposium on Virtual Environments*, p. 8 (2014).
- [Ochs et al.(2014)] Magalie Ochs, Yu Ding, Nesrine Fourati, Mathieu Chollet, Brian Ravenet, Florian Pecune, Nadine Glas, Ken Prepin, Chloe Clavel, & Catherine Pelachaud. Vers des agents conversationnels animés dotés d’émotions et d’attitudes sociales (2014).
- [Orkin(2003)] Jeff Orkin. Applying goal-oriented action planning to games. *AI game programming wisdom 2* :217–228 (2003).
- [Orkin & Roy(2008)] Jeff Orkin & Deb Roy. The restaurant game : Learning social behavior and language from thousands of players online. *J. Game Dev.* 3(1) :39–60 (2008).
- [Osgouei & Choi(2012)] Reza Haghighi Osgouei & Seungmoon Choi. Evaluation of driving skills using an hmm-based distance measure. In *Haptic Audio Visual Environments and Games (HAVE), 2012 IEEE International Workshop on*, pp. 50–55. IEEE (2012).
- [Ouramdane et al.(2009)] Nassima Ouramdane, Samir Otmane, & Malik Mallem. Interaction 3d en Réalité Virtuelle - état de l’Art (2009).
- [Panzoli et al.(2017)] David Panzoli, Catherine Pons Lelardeux, Michel Galaup, Pierre Lagarrigue, Vincent Minville, & Vincent Lubrano. Interaction and communication in an immersive learning game : The challenges of modelling real-time collaboration in a

-
- virtual operating room. In *Serious Games and Edutainment Applications*, pp. 147–186. Springer (2017).
- [Panzoli et al.(2010a)] David Panzoli, Christopher Peters, Ian Dunwell, Stephane Sanchez, & Panagiotis Petridis. Levels of interaction : A user-guided experience in large-scale virtual environments. In *Proceedings of the second International Conference on Games and Virtual Worlds for Serious Applications (VS-GAMES'10)*, pp. 87–90, Braga, Portugal (2010a).
- [Panzoli et al.(2010b)] David Panzoli, Christopher Peters, Ian Dunwell, Stéphane Sanchez, Panagiotis Petridis, Aristidis Protopsaltis, Vincent Scesa, & Sara de Freitas. A level of interaction framework for exploratory learning with characters in virtual environments. In *Intelligent Computer Graphics 2010*, pp. 123–143. Springer (2010b).
- [Panzoli et al.(2015a)] David Panzoli, Catherine Pons-Lelardeux, & Pierre Lagarrigue. Communication and knowledge sharing in immersive learning games (regular paper). In *Proceedings of the Seventh International Conference on Virtual Worlds and Games for Serious Applications (VS-Games'15)*, Skövde, Sweden (2015a).
- [Panzoli et al.(2015b)] David Panzoli, Catherine Pons-Lelardeux, & Pierre Lagarrigue. L'interaction et la manipulation d'information dans un learning game immersif et collaboratif. In *27ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine.*, p. d02, Toulouse, France (2015b).
- [Panzoli et al.(2010c)] David Panzoli, Adam Qureshi, Ian Dunwell, Panagiotis Petridis, Sara de Freitas, & Genaro Rebolledo-Mendez. Levels of interaction (loi) : a model for scaffolding learner engagement in an immersive environment. In *International Conference on Intelligent Tutoring Systems*, pp. 393–395. Springer (2010c).
- [Panzoli et al.(2019)] David Panzoli, Paco Royeres, & Mathéo Fedou. Hand-based interactions in virtual reality : No better feeling than the real thing. In *11th International Conference on Virtual Worlds and Games for Serious Applications, VS-Games 2019, Vienna, Austria, September 4-6, 2019*, pp. 1–2 (2019).
- [Panzoli et al.(2014)] David Panzoli, Maxime Sanselone, Stephane Sanchez, Cédric Sanza, Cathy Lelardeux, Pierre Lagarrigue, & Yves Duthen. Introducing a design methodology for multi-character collaboration in immersive learning games (regular paper). In *Proceedings of the Sixth International Conference on Virtual Worlds and Games for Serious Applications (VS-Games'14)*, p. (electronic medium), Valletta, Malta (2014).
- [Papamitsiou & Economides(2014)] Zacharoula Papamitsiou & Anastasios A Economides. Learning analytics and educational data mining in practice : A systematic literature review of empirical evidence. *Journal of Educational Technology & Society* 17(4) :49–64 (2014).
- [Parvati & Heinrichs(2011)] DEV Parvati & W LeRoy Heinrichs. Clinispace™ : A multiperson 3d online immersive training environment accessible through a browser. *Medicine Meets Virtual Reality 18 : NextMed* 163 :173 (2011).
- [Pausch et al.(1994)] Randy Pausch, Rich Gold, Tim Skelly, & David Thiel. What hci designers can learn from video game designers. In *Conference companion on human factors in computing systems*, pp. 177–178. ACM (1994).

- [Pausch et al.(1997)] Randy Pausch, Dennis Proffitt, & George Williams. Quantifying immersion in virtual reality. In *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 13–18 (1997).
- [Pelachaud et al.(2015)] Catherine Pelachaud, Chloe Clavel, Ken Prepin, Nadine Glas, Florian Pecune, Brian Ravenet, Mathieu Chollet, Nesrine Fourati, Yu Ding, & Magalie Ochs. Vers des agents conversationnels animés dotés d’émotions et d’attitudes sociales. *Journal d’Interaction Personne-Système* 3 (2015).
- [Petridis et al.(2010)] Panagiotis Petridis, Ian Dunwell, Sara De Freitas, & David Panzoli. An engine selection methodology for high fidelity serious games. In *Games and Virtual Worlds for Serious Applications (VS-GAMES), 2010 Second International Conference on*, pp. 27–34. IEEE (2010).
- [Pettré et al.(2006)] Julien Pettré, Pablo de Heras Ciechowski, Jonathan Maïm, Barbara Yersin, Jean-Paul Laumond, & Daniel Thalmann. Real-time navigating crowds : scalable simulation and rendering : Research articles. *Comput. Animat. Virtual Worlds* 17(3-4) :445–455 (2006).
- [Peytavie(2010)] Adrien Peytavie. *Génération procédurale de Monde*. Ph.D. thesis (2010).
- [Psotka(1995)] Joseph Psotka. Immersive training systems : Virtual reality and education and training. *Instructional science* 23(5-6) :405–431 (1995).
- [Psyché et al.(2003)] Valéry Psyché, Olavo Mendes, & Jacqueline Bourdeau. Apport de l’ingénierie ontologique aux environnements de formation à distance. *Sciences et Technologies de l’Information et de la Communication pour l’Éducation et la Formation* 10 :89–126 (2003).
- [Rabardel(1995)] Pierre Rabardel. *Les hommes et les technologies ; approche cognitive des instruments contemporains*. Armand Colin (1995).
- [Reynaud & Corruble(2013)] Quentin Reynaud & Vincent Corruble. Un mécanisme de composition de comportements pour agents virtuels (2013).
- [Ricca et al.(2020)] Aylen Ricca, Amine Chellali, & Samir Otmane. Influence of hand visualization on tool-based motor skills training in an immersive vr simulator. In *19th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2020)* (2020).
- [Richards & Taylor(2015)] Deborah Richards & Meredith Taylor. A comparison of learning gains when using a 2d simulation tool versus a 3d virtual world : An experiment to find the right representation involving the marginal value theorem. *Computers & Education* 86 :157 – 171 (2015).
- [Rickel & Johnson(1997)] Jeff Rickel & W Lewis Johnson. Intelligent tutoring in virtual reality : A preliminary report. In *Proceedings of the eighth World Conference on AI in Education*, pp. 294–301. IOS Press Amsterdam (1997).
- [Rickel & Johnson(1999)] Jeff Rickel & W Lewis Johnson. Animated agents for procedural training in virtual reality : Perception, cognition, and motor control. *Applied artificial intelligence* 13(4-5) :343–382 (1999).
- [Robertson et al.(1997)] George Robertson, Mary Czerwinski, & Maarten Van Dantzich. Immersion in desktop virtual reality. In *Proceedings of the 10th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 11–19. ACM (1997).

-
- [Rocha et al.(2008)] José Bernardo Rocha, Samuel Mascarenhas, & Rui Prada. Game mechanics for cooperative games. *ZON Digital Games 2008* pp. 72–80 (2008).
- [Rolfe & Staples(1988)] John M Rolfe & Ken J Staples. *Flight simulation*. Cambridge University Press (1988).
- [Sabourin et al.(2013)] Jennifer L Sabourin, Lucy R Shores, Bradford W Mott, & James C Lester. Understanding and predicting student self-regulated learning strategies in game-based learning environments. *International Journal of Artificial Intelligence in Education* 23(1-4) :94–114 (2013).
- [Sanchez et al.(2004)] Stephane Sanchez, Olivier Balet, Hervé Luga, & Yves Duthen. VIBES : bringing autonomy to virtual characters. In *Third IEEE International Symposium and School on Advance Distributed Systems, , 26-30 january 2004, Guadalajara, México, 26/01/2004-30/01/2004*, pp. 19–30. Springer Verlag LNCS (2004).
- [Sanselone et al.(2014a)] Maxime Sanselone, Stéphane Sanchez, Cédric Sanza, David Panzoli, & Yves Duthen. Constrained control of non-playing characters using monte carlo tree search. In *2014 IEEE Conference on Computational Intelligence and Games*, pp. 1–8. IEEE (2014a).
- [Sanselone et al.(2014b)] Maxime Sanselone, Stéphane Sanchez, Cédric Sanza, David Panzoli, & Yves Duthen. Control of non player characters in a medical learning game with monte carlo tree search. In *Proceedings of the Companion Publication of the 2014 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, pp. 51–52. ACM (2014b).
- [Sarray(2019)] Ines Sarray. *Conception de systèmes de reconnaissance d’activités humaines*. Ph.D. thesis, COMUE Université Côte d’Azur (2015-2019) (2019).
- [Sas et al.(2004)] Corina Sas, Gregory MP O’Hare, & Ronan Reilly. Presence and task performance : an approach in the light of cognitive style. *Cognition, Technology & Work* 6(1) :53–56 (2004).
- [Scapin & Bastien(2001)] Dominique Louis Scapin & Christian Bastien. Analyse des tâches et aide ergonomique à la conception : l’approche mad*. *Analyse et conception de l’IHM* pp. 85–116 (2001).
- [Schrepp et al.(2014)] Martin Schrepp, Andreas Hinderks, & Jörg Thomaschewski. Applying the user experience questionnaire (ueq) in different evaluation scenarios. In *International Conference of Design, User Experience, and Usability*, pp. 383–392. Springer (2014).
- [Seif El-Nasr et al.(2010)] Magy Seif El-Nasr, Bardia Aghabeigi, David Milam, Mona Erfani, Beth Lameman, Hamid Maygoli, & Sang Mah. Understanding and evaluating cooperative games. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 253–262. ACM (2010).
- [Shao & Terzopoulos(2007)] Wei Shao & Demetri Terzopoulos. Autonomous pedestrians. *Graphical models* 69(5-6) :246–274 (2007).
- [Sheridan(1992)] Thomas B Sheridan. Musings on telepresence and virtual presence. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments* 1(1) :120–126 (1992).

- [Shute(2011)] Valerie J Shute. Stealth assessment in computer-based games to support learning. *Computer games and instruction* 55(2) :503–524 (2011).
- [Shute et al.(2009)] Valerie J Shute, Matthew Ventura, Malcolm Bauer, & Diego Zapata-Rivera. Melding the power of serious games and embedded assessment to monitor and foster learning. *Serious games : Mechanisms and effects* 2 :295–321 (2009).
- [Shute et al.(2016)] Valerie J Shute, Lubin Wang, Samuel Greiff, Weinan Zhao, & Gregory Moore. Measuring problem solving skills via stealth assessment in an engaging video game. *Computers in Human Behavior* 63 :106–117 (2016).
- [Slater(2009)] Mel Slater. Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B : Biological Sciences* 364(1535) :3549–3557 (2009).
- [Slater(2017)] Mel Slater. Implicit learning through embodiment in immersive virtual reality. In *Virtual, Augmented, and Mixed Realities in Education*, pp. 19–33. Springer (2017).
- [Slater(2018)] Mel Slater. Immersion and the illusion of presence in virtual reality. *British Journal of Psychology* 109(3) :431–433 (2018).
- [Slater & Sanchez-Vives(2016)] Mel Slater & Maria V Sanchez-Vives. Enhancing our lives with immersive virtual reality. *Frontiers in Robotics and AI* 3 :74 (2016).
- [Squire & Jenkins(2003)] Kurt Squire & Henry Jenkins. Harnessing the power of games in education. *Insight* 3(1) :5–33 (2003).
- [Sra et al.(2018)] Misha Sra, Ken Perlin, Luiz Velho, & Mark Bolas. Novel interaction techniques for collaboration in vr. In *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–8 (2018).
- [Steed(2008)] Anthony Steed. Some useful abstractions for re-usable virtual environment platforms. *Software Engineering and Architectures for Realtime Interactive Systems-SEARIS* (2008).
- [Sternberger(2006)] Ludovic Sternberger. *Interaction en réalité virtuelle*. Ph.D. thesis, Strasbourg 1 (2006).
- [Stoakley et al.(1995)] Richard Stoakley, Matthew J Conway, & Randy Pausch. Virtual reality on a wim : interactive worlds in miniature. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp. 265–272 (1995).
- [Sweetser & Wyeth(2005)] Penelope Sweetser & Peta Wyeth. Gameflow : a model for evaluating player enjoyment in games. *Computers in Entertainment (CIE)* 3(3) :3–3 (2005).
- [Sycara & Paolucci(2004)] Katia Sycara & Massimo Paolucci. Ontologies in agent architectures. In *Handbook on ontologies*, pp. 343–363. Springer (2004).
- [Taekman et al.(2007)] Jeffrey M Taekman, Noa Segall, E Hobbs, & Melanie Wright. 3diteams–healthcare team training in a virtual environment. *Anesthesiology* 107(A2145) :A2145 (2007).
- [Taoum et al.(2016)] Joanna Taoum, Bilal Nakhal, Elisabetta Bevacqua, & Ronan Querrec. A design proposition for interactive virtual tutors in an informed environment. In *International Conference on Intelligent Virtual Agents*, pp. 341–350. Springer (2016).

-
- [Tellols et al.(2020)] Dolça Tellols, Maite Lopez-Sanchez, Inmaculada Rodríguez, Pablo Almajano, & Anna Puig. Enhancing sentient embodied conversational agents with machine learning. *Pattern Recognition Letters* 129 :317–323 (2020).
- [Thomas & Vlacic(2011)] Daniel I Thomas & Ljubo B Vlacic. Human and virtual beings as equal collaborative partners in computer games. In *Computer Games as Educational and Management Tools : Uses and Approaches*, pp. 23–51. IGI Global (2011).
- [Thouvenin(2009)] Indira Mouttapa Thouvenin. *Interaction et connaissance : construction d’une expérience dans le monde virtuel*. Ph.D. thesis, Université de Technologie de Compiègne (2009).
- [Tranvouez et al.(2014)] Erwan Tranvouez, Sébastien Fournier, et al. A multiagent architecture for collaborative serious game applied to crisis management training : improving adaptability of non player characters. *EAI Endorsed Transactions on Serious Games* 1(2) (2014).
- [Tricot(2007)] André Tricot. Utility, usability and acceptability : an ergonomic approach to the evaluation of external representations for learning. In *12th Biennial Conference for Research on Learning and Instruction* (2007).
- [Trimmer(2010)] Matthew Trimmer. Emergent leader immersive training environment (ELITE). [http ://ict.usc.edu/prototypes/elite/](http://ict.usc.edu/prototypes/elite/) (2010).
- [Van Der Veer et al.(1996)] Gerrit C Van Der Veer, Bert F Lenting, & Bas AJ Bergevoet. Gta : Groupware task analysis—modeling complexity. *Acta psychologica* 91(3) :297–322 (1996).
- [Vermeulen et al.(2016)] Mathieu Vermeulen, Nadine Mandran, & Jean-Marc Labat. Disco, a formal model of serious games to help teachers at the design stage. In *Doctoral Consortium CSEDU 2016 (DCCSEDU 2016)*, pp. 3–8 (2016).
- [Véron et al.(2014)] Maxime Véron, Olivier Marin, & Sébastien Monnet. Matchmaking in multi-player on-line games : studying user traces to improve the user experience. In *Proceedings of Network and Operating System Support on Digital Audio and Video Workshop*, pp. 7–12 (2014).
- [Vine et al.(2012)] Samuel J Vine, Rich SW Masters, John S McGrath, Elizabeth Bright, & Mark R Wilson. Cheating experience : Guiding novices to adopt the gaze strategies of experts expedites the learning of technical laparoscopic skills. *Surgery* 152(1) :32–40 (2012).
- [Vosinakis(2017)] Spyros Vosinakis. Digital characters in cultural heritage applications. *International Journal of Computational Methods in Heritage Science (IJCMHS)* 1(2) :1–20 (2017).
- [Vygotsky(1978)] Lev Vygotsky. Interaction between learning and development. *Readings on the development of children* 23(3) :34–41 (1978).
- [Wallace(2003)] Richard Wallace. The elements of aiml style. *Alice AI Foundation* 139 (2003).
- [Westera et al.(2014)] Wim Westera, Rob Nadolski, & Hans Hummel. Serious gaming analytics : What students’ log files tell us about gaming and learning. *International Journal of Serious Games* 1(2) (2014).

- [Wickens(1992)] Christopher D Wickens. Virtual reality and education. In *Systems, Man and Cybernetics, 1992., IEEE International Conference on*, pp. 842–847. IEEE (1992).
- [Winn(1993)] William Winn. A conceptual basis for educational applications of virtual reality. *Technical Publication R-93-9, Human Interface Technology Laboratory of the Washington Technology Center, Seattle : University of Washington* (1993).
- [Xi & Smith(2014)] Mingze Xi & Shamus P Smith. Simulating cooperative fire evacuation training in a virtual environment using gaming technology. In *2014 IEEE virtual reality (VR)*, pp. 139–140. IEEE (2014).
- [Yannakakis & Hallam(2009)] Georgios N Yannakakis & John Hallam. Real-time game adaptation for optimizing player satisfaction. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games* 1(2) :121–133 (2009).
- [Yannakakis & Paiva(2014)] Georgios N Yannakakis & Ana Paiva. Emotion in games. *Handbook on affective computing* pp. 459–471 (2014).
- [Yee et al.(2009)] Nick Yee, Jeremy N Bailenson, & Nicolas Ducheneaut. The proteus effect : Implications of transformed digital self-representation on online and offline behavior. *Communication Research* 36(2) :285–312 (2009).
- [Youngblut(1998)] Christine Youngblut. Educational Uses of Virtual Reality Technology. Tech. rep., Institute for Defence Analyses (1998).
- [Zhang et al.(2019)] Lei Zhang, Doug A Bowman, & Caroline N Jones. Exploring effects of interactivity on learning with interactive storytelling in immersive virtual reality. In *2019 11th International Conference on Virtual Worlds and Games for Serious Applications (VS-Games)*, pp. 1–8. IEEE (2019).
- [Zoeller(2013)] Georg Zoeller. *Game Development Telemetry in Production*, pp. 111–135. Springer London, London (2013).
- [Zwingelstein(1995)] Gilles Zwingelstein. *Diagnostic des défaillances : théorie et pratique pour les systèmes industriels*. Hermès (1995).

Résumé

Dans un jeu d'apprentissage immersif, la transmission des savoirs et des compétences est mise en œuvre à travers des expériences interactives, conçues et orchestrée par l'enseignant, puis vécues et intégrées par l'apprenant. Le processus de transmission des savoirs, de la conception de l'outil à l'évaluation du succès des objectifs, s'organise donc autour de la notion d'interactions pédagogiques : des interactions qu'il faut modéliser, entre le joueur d'une part et d'autre part l'environnement et les autres personnages (eux-mêmes joueurs ou non-joueurs) ; des interactions qu'il faut rendre techniquement et ergonomiquement accessibles dans l'environnement de formation, et enfin ; des interactions qu'il faut observer, collecter et analyser pour en confirmer la pertinence, ou bien pour évaluer la performance du joueur en regard des objectifs d'apprentissage initiaux. L'interaction pédagogique est ainsi le vecteur de réalisation des deux potentiels qu'on associe à ces outils : l'apprentissage immersif et l'engagement ludique. Dans ce mémoire, comme on suivrait la transformation par opérations successives d'un brut en un outil manufacturé, nous décrivons étape par étape la trajectoire des interactions pédagogiques au cours de la conception et de l'implémentation d'un jeu d'apprentissage immersif.

Mots-clés: Réalité Virtuelle, jeu sérieux, apprentissage immersif, interaction 3D

Abstract

In an immersive learning game, transferring knowledge and skills is achieved by means of interactive experiences, modelled and orchestrated by the teacher, to be lived and integrated by the learner. This transfer process, from designing the tool to evaluating its successful usage, revolves around the concept of pedagogical interaction: interactions that must be modelled, between the player and the environment or other characters (human players or non-player characters) ; interactions that must be made accessible technically in the virtual environment, with user-friendliness in mind ; and finally, interactions that must be monitored, collected and analysed in order to evaluate the user's performance, in regards of the initial educational objectives. The pedagogical interaction is therefore the vector by which two potentials inherent to learning games are expected to be realised: immersive learning and game engagement. This thesis follows, each chapter a step, the trajectory of a pedagogical interaction along the design and implementation process of an immersive learning game.

Keywords: Virtual Reality, Serious Games, Immersive Learning, 3D Interaction

