

Université de Limoges

École Doctorale Sciences et Ingénierie des systèmes Mathématiques et informatiques (ED 610)
Institut XLIM (UMR CNRS 7252)

Thèse pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université de Limoges
Informatique et applications

Présentée et soutenue par

Richard NGU LEUBOU

le 9 juin 2021

Impact de la réalité virtuelle sur la formation à distance

Thèse dirigée par:

M. Benoit Crespin Maître de Conférences HDR à l'Université de Limoges – XLIM – Limoges

M. Marc Trestini Maître de Conférences HDR à l'Université de Strasbourg – LISEC – Strasbourg

Jury:

Président de Jury :

M. Pascal Guitton Professeur à l'Université de Bordeaux – INRIA – Bordeaux

Rapporteurs :

M. Pascal Guitton Professeur à l'Université de Bordeaux – INRIA – Bordeaux

M. Stéphane Simonian Professeur à l'Université Lyon 2 – ISPEF – LYON

Examineurs :

M. Pascal Guitton Professeur à l'Université de Bordeaux – INRIA – Bordeaux

M. Stéphane Simonian Professeur à l'Université Lyon 2 – ISPEF/ECP – LYON

M. Guillaume Gilet Professeur en informatique à l'Université de Sherbrooke – Québec CANADA

M. Benoit Crespin Maître de Conférences HDR à l'Université de Limoges – XLIM – Limoges

M. Marc Trestini Maître de Conférences HDR à l'Université de Strasbourg – LISEC – Strasbourg

A ma très chère maman, elle saura pourquoi...

Remerciements

Mes premiers remerciements sont pour les membres du jury : Pascal Guitton, Stéphane Simonian, Guillaume Gilet, Benoit Crespin et Marc Trestini. Merci à eux pour le temps consacré à rapporter ou à examiner mes travaux de thèse.

Je remercie très sincèrement Benoit Crespin et Marc Trestini pour avoir accepté de me diriger dans mes travaux. J'ai pu finir ma thèse dans d'excellentes conditions malgré la crise sanitaire du COVID 19.

Je désire aussi remercier l'Association Française de Réalité Virtuelle, Augmentée, Mixte et d'Interaction 3D (AFRV), l'Association Française d'Informatique graphique (AFIG), la Communauté des Environnements Informatique pour l'Apprentissage Humain (EIAH) pour m'avoir permis de partager mes travaux avec vous. Merci pour les différents échanges et commentaires constructifs sur mes travaux.

Je souhaite adresser des remerciements particuliers à ma Maman. Quelques mots ne suffisent pas pour traduire ma gratitude, mon admiration et mon affection. Je remercie également ma sœur Raïssa, mon frère Serges, et mes amis Holly, Néhémie, Michael, Alain, Marcel, Virginie, Léna, Alane. Un grand merci à la famille OUYA et la famille NOUMBA pour le soutien moral pendant ces trois années. Vous avez toujours été présent à chaque sollicitation.

Je veux également remercier tous les étudiants du MASTER 2 SYNVA de la promo 2019/2020 de l'université de Strasbourg, Yohan, Tiffany, Ilyass, Lynda, François, Messaouda et les autres étudiants : Agnès, Abdel, Laury, Delphine, Franck ainsi que tous ceux que je n'ai pas cités pour vos participations aux expérimentations.

Je n'oublie pas mes collègues François-Xavier, Pascal, Philippe pour les relectures et Pricille pour la correction de certaines traductions.

Table des matières

Remerciements	2
Table des matières	3
Table des figures	6
Liste des tableaux	8
Liste des abréviations	9
Résumé	10
Chapitre 1 : INTRODUCTION	12
Chapitre 2 : LA RÉALITÉ VIRTUELLE ET SES CONCEPTS-CLÉS	16
2.1 La réalité virtuelle	17
2.1.1 Contexte historique de la Réalité Virtuelle (RV)	17
2.1.2 Cadre théorique de la réalité virtuelle	22
2.2 La réalité augmentée et la réalité mixte	36
Chapitre 3 : LA FORMATION À DISTANCE	38
3.1 L'apprentissage : cadre théorique	39
3.1.1 Le behaviorisme	39
3.1.2 Le cognitivisme	40
3.1.3 Le constructivisme	40
3.1.4 Le socioconstructivisme	41
3.1.5 Le connectivisme	42
3.1.6 Tableau récapitulatif des théories d'apprentissage	43
3.2 Histoire de la formation à distance	44
3.3 Concept de la formation à distance	45
3.3.1 Les théories fondatrices de la formation à distance	46
3.3.2 Les modalités de formation à distance	47
3.3.3 Les diverses dimensions de la distance	53
3.4 Les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain	54
3.5 Les ERV pour la formation à distance : VD-Learning	55
Chapitre 4 : LA REALITE VIRTUELLE ET L'APPRENTISSAGE HUMAIN	57
4.1 État de l'art	58
4.1.1 Réalité virtuelle et apprentissage humain	59
4.1.2 Réalité virtuelle et formation à distance	61

4.2	Problématiques et hypothèses de recherche	63
Chapitre 5 : LA CONCEPTION DES VD-LEARNING		67
5.1	Modèle de référence pour la conception d'un environnement de RV	68
5.1.1	Les 3 niveaux d'immersion et d'interaction	68
5.1.2	Les aides logicielles comportementales virtuelles	71
5.2	Les défis liés à la conception d'un VD-Learning	72
5.2.1	Les défis techniques liés à la RV	72
5.2.2	Les défis liés au confort et à la santé	75
5.2.3	Les défis liés à l'apprentissage humain	76
5.2.4	Les défis spécifiques à la formation à distance	77
5.3	Les différentes méthodologies de conception des ERV	77
5.3.1	Les approches de conception d'ERV générales	77
5.3.2	Les approches de conception d'ERV spécifiques à l'apprentissage	81
5.4	Formalisation d'une approche de conception d'un VD-Learning	83
5.4.1	Etape 1 : Spécifier le contexte d'utilisation et les objectifs pédagogiques	83
5.4.2	Etape 2 : Spécifier le VD-Learning	87
5.4.3	Etape 3 : Concevoir les prototypes	90
5.4.4	Etape 4 : Évaluer les solutions réalisées	90
5.4.5	Schéma de conception avec les interdépendances	93
5.5	Outils de réalisation des environnements RV	93
5.5.1	Les plateformes de développement dédiées à la RV	94
5.5.2	Moteurs de jeu équipés de bibliothèques VR	94
5.5.3	Middlewares RV	95
5.5.4	Les Content Management System (CMS) de réalité virtuelle	95
Chapitre 6 : CRÉATION D'UN ENVIRONNEMENT DE RV COLLABORATIF BASÉ SUR LE WEB		99
6.1	Méthodologie de travail	100
6.2	Contexte d'utilisation du VD-Learning	101
6.3	Spécification du VD-Learning	102
6.3.1	Spécification des Interfaces Homme-Machine (IHM)	102
6.3.2	Spécification de l'Environnement de Réalité Virtuelle Collaboratif (ERVC)	103
6.3.3	Les autres recommandations pour un VD-Learning collaboratif	108
6.4	Description du VD-Learning collaboratif créé dans le cadre de nos travaux	110
Chapitre 7 : EXPERIMENTATION DE LA COPRESENCE DANS UN VD-LEARNING COLLABORATIF		112
7.1	Méthodologie de recherche	113
7.2	Description de l'expérimentation	114
7.2.1	Caractéristiques de l'environnement d'expérimentation	114
7.2.2	Description de la situation d'apprentissage	115
7.2.3	Déroulement de l'expérimentation	115
7.3	Résultats et analyses	117

7.3.1	Évaluation de l'implication des apprenants dans la réalisation d'activités groupales	117
7.3.2	Évaluation du degré de chaleur ressenti dans la communication entre apprenants	119
7.3.3	Évaluation du niveau de disposition à partager les informations personnelles	120
7.3.4	Évaluation du sentiment de proximité entre apprenants	121
7.3.5	Évaluation des échanges vocaux entre apprenants	123
7.3.6	Évaluation de la motivation à réaliser des activités groupales avec d'autres apprenants	125
7.3.7	Tableau récapitulatif des résultats	126
7.4	Conclusion	126
Chapitre 8 : CONCLUSION		127
Bibliographie		132
Annexe 1 : questionnaire de Nowak		144

Table des figures

1.1	Estimation du marché de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée en 2025 selon trois scénarios d'usage	13
2.1	Le Telesphere Mask de Morton Heilig (Stereoscopic television apparatus for individual use, U.S. Patent n° 2,955,156, 4 oct. 1960)	18
2.2	Une affiche vantant le Sensorama. Source : http://www.telepresence.com	18
2.3	L'épée de Damoclès [Sut68]	19
2.4	Gant à retour de force : (a) Manipulateur principal, (b) Structure de retour de force pour le gant de données	19
2.5	Une affiche vantant le Sensorama. Source : http://www.telepresence.com	19
2.6	BOOM	21
2.7	CAVE (source : Wikipédia)	21
2.8	Schéma anthropocentrique de la perception du monde virtuel par l'homme	24
2.9	Boucle perception-décision-action [Fuc18]	24
2.10	Niveau d'immersion et d'interaction sensorimotrice de l'interfaçage comportemental [Fuc18]	27
2.11	Téléportation	29
2.12	Zone de flow [Csi90]	34
2.13	Avatar expressifs Oculus	35
2.14	Le continuum de la virtualité de Milgram et Kishino [MK94]	37
2.15	Casque de réalité mixte HoloLens	37
3.1	Modèle comportemental de Fechner [MLJI19]	40
3.2	Assimilation/accommodation [MLJI19]	41
3.3	Le connectivisme [MLJI19]	42
3.4	Supports d'apprentissage ASSIMIL des années 1930 aux années 1970-80 [Mar14]	44
3.5	Théorie de l'E-learning (traduit de l'anglais depuis [AB13])	48
3.6	Formation hybride source : https://pedagogie.ac-rennes.fr/spip.php?article4102	50
3.7	Représentation d'une formation comodale	51
4.1	Sondage sur l'utilisation de la RV	65
5.1	Schéma général à trois niveaux d'immersion et d'interaction [Fuc16]	69
5.2	Manipulation [GFDSK+20]	74
5.3	Interdépendance des activités de conception centrée sur l'opérateur humain [fS19]	78
5.4	Figure 22 : Taxonomie de Bloom [B+56] révisée par Anderson et Krathwohl [ALGA01]	84
5.5	Profils cognitifs de Kolb	85
5.6	Priorisation des SA	86
5.7	La place de l'utilisateur dans l'expérience	89
5.8	Boucle de conception spécification-prototypage-évaluation	91
5.9	Schéma de conception avec les interdépendances des étapes	93
6.1	Interface de préparation d'une situation d'apprentissage sur Mozilla hubs	103
6.2	Interface de préparation d'une situation d'apprentissage sur vlearning.fr	104

6.3	Aide logicielle comportementale pour la communication dans le VD-Learning .	106
6.4	Sondage sur la durée d'une situation d'apprentissage dans un VD-Learning . .	108
6.5	WebRTC avec un server Traversal Using Relays around NAT (TURN)	109
7.1	Salle de classe virtuelle	115
7.2	Apprenants dans la salle virtuelle représentés sur forme de sphère	116
7.3	Apprenants dans la salle virtuelle représentés sur forme de personnage imaginaire (type robot)	116
7.4	Apprenants dans la salle virtuelle représentés avec une forme humaine	117

Liste des tableaux

2.1	Les différentes performances qualitatives des systèmes de RV (traduit depuis [Kal93])	33
3.1	Synthèse des grands courants épistémologiques	43
5.1	Représentation mentale du déplacement	70
7.1	Adaptation du questionnaire subjectif de Nowak	114
7.2	Résultat du tri croisé pour l'ensemble des variables	126

Liste des abréviations

- ACV** – Actions Comportementales Virtuelles.
- ALC** – Aides Logicielles Comportementales.
- ALCog** – Aides Logicielles Cognitives.
- ALSM** – Aides Logicielles Sensorimotrice.

- BOOM** – Binocular Omni-Orientation Monitor.

- CAVE** – CAVE Automatic Virtual Environment.
- CCOH** – Conception Centrée sur l'Opérateur Humain.
- CMS** – Content Management System.

- EIAH** – Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain.
- ER** – Environnement Réel.
- ERV** – Environnement de Réalité Virtuelle.
- ERVc** – Environnement de Réalité Virtuelle Collaboratif.
- EV** – Environnement Virtuel.
- EVAH** – Environnements Virtuels pour l'Apprentissage Humain.
- EVE** – Environnement Virtuel Éducatif.

- FAD** – Formation à Distance.

- IHM** – Interfaces Homme-Machine.
- ISO** – Organisation Internationale de la Normalisation.

- PCV** – Primitives Comportementales Virtuelles.

- RA** – Réalité Augmentée.
- RM** – Réalité Mixte.
- RV** – Réalité Virtuelle.

- SA** – Situation d'Apprentissage.

- TICE** – Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Enseignement.
- TURN** – Traversal Using Relays around NAT.

- VIVED** – Virtual Visual Environment Display.
- VRML** – Virtual Reality Modeling Language.

Impact de la réalité virtuelle sur la formation à distance

Résumé : Les diverses possibilités offertes par la réalité virtuelle ont permis d'explorer différents usages dans plusieurs domaines scientifiques. Dans le domaine des apprentissages, il ressort des différentes études que cette technologie a un impact positif sur l'éducation. Elle offre une flexibilité puissante dans les possibilités de présenter l'information à l'apprenant et introduit les activités sensorimotrices (corporelles) et cognitives dans les processus d'apprentissage. Les formations réalisées dans des environnements de réalité virtuelle présentent de nombreux avantages par rapport aux formations réalisées dans des environnements réels. De plus, plusieurs travaux de recherche ont permis de montrer que cette technologie a une influence positive sur l'expérience utilisateur des apprenants. Bien que l'apport de la réalité virtuelle soit avéré dans le domaine de l'apprentissage en général, le secteur de la formation à distance reste peu exploré par la recherche. Les premiers travaux de recherche ont permis de faire ressortir l'utilité de cette technologie notamment pour les situations d'apprentissage collaboratives impliquant les apprenants dans le processus, et favorisant les interactions apprenant-apprenant et apprenant-enseignant. Cependant, il existe encore très peu d'informations permettant d'évaluer l'utilisabilité et l'acceptabilité (ou l'expérience utilisateur) de cette technologie dans un contexte de formation à distance. En outre la conception des environnements de réalité virtuelle est considérée comme une tâche complexe, car il est difficile d'anticiper le comportement et la manière dont les utilisateurs percevront, comprendront et utiliseront l'artefact. Le risque qu'un environnement conçu ne satisfasse pas aux exigences attendues est alors élevé. De plus, la distance, qui constitue l'une des causes majeures du décrochage dans des dispositifs de formation à distance est peu ou pas traitée dans les approches de conception existantes. Dans cette thèse, nous proposons premièrement de formaliser une approche de conception des environnements de réalité virtuelle spécifique à la formation à distance. Notre approche est basée sur le modèle général de la réalité virtuelle et la conception centrée opérateur humain, et met l'accent sur les spécificités de la distance. Ensuite nous proposons la spécification d'un environnement de réalité virtuelle collaboratif pour la formation à distance en nous basant sur une approche s'apparentant à la conception orientée par la recherche. Enfin, à la suite d'une mise en situation des apprenants dans un environnement de réalité virtuelle collaboratif, nous montrons comment la réalité virtuelle impacte positivement le sentiment de coprésence entre apprenants dans un contexte de formation à distance.

Mots clés : Réalité virtuelle, formation à distance, expérience utilisateur, EIAH, Conception.

Impact of virtual reality on Distance Learning

Abstract : The various possibilities offered by virtual reality have made it possible to explore different uses in several scientific fields. In the field of learning, various studies have shown that this technology has a positive impact on education. It offers a powerful flexibility in the possibilities of presenting information to the learner and introduces sensorimotor and cognitive activities in the learning process. Training in virtual reality environments has many advantages over training in real environments. In addition, several research studies have shown that this technology has a positive influence on the user experience of learners. Although the contribution of virtual reality is proven in the field of learning in general, the distance learning sector remains little explored by research. The first research studies have shown the usefulness of this technology, particularly for collaborative learning situations involving participants in the learning process, and promoting learner-learner and learner-teacher interactions. However, there is still very little information available to evaluate the usability and acceptability (or user experience) of this technology in a distance learning context. Furthermore, the design of virtual reality environments is considered a complex task, as it is difficult to anticipate the behavior and the way users will perceive, understand and use the artifact. The risk that a designed environment will not meet the expected requirements is then high. Moreover, the distance between participants, which is one of the major causes of dropout in distance learning courses, is little or not addressed in existing design approaches. In this thesis, we first propose to formalize a design approach for virtual reality environments specific to distance learning. Our approach is based on the general model of virtual reality and the human operator-centered design, and focuses on the specificities of distance. Then we propose the specification of a collaborative virtual reality environment for distance learning based on a research-oriented design approach. Finally, following an experimentation with several participants in a collaborative virtual reality environment, we show how virtual reality positively impacts the feeling of co-presence between learners in a distance learning context.

Keywords : Virtual reality, distance learning, user experience, GUI design.

Univ. de Limoges, CNRS, XLIM, UMR 7252, F-87000 Limoges, France

Chapitre 1

INTRODUCTION

Deux évènements majeurs ont donné naissance à la réalité virtuelle : en 1935, Stanley G. Weinbaum publie une nouvelle intitulée *Pygmalion's Spectacles*¹ dans laquelle il émet l'idée d'une lunette permettant à celui qui les porte d'accéder à un univers virtuel où il peut interagir, toucher et sentir [KHPS20] ; en 1958, le cinéaste Morton Heilig met au point une expérience permettant aux spectateurs de s'immerger dans des courts métrages en trompant leurs sens par la simulation des odeurs, la production du son en stéréo, les vibrations, les effets atmosphériques [Ama14]. Pendant ces trois dernières décennies, la réalité virtuelle a progressivement trouvé des usages utiles dans plusieurs secteurs [Fuc18] tels que la santé, l'industrie, l'architecture, l'urbanisation, le domaine artistique, les jeux vidéo, les réseaux sociaux, l'apprentissage, etc. [Fuc18]. L'arrivée des visiocasques accessibles au grand public a conduit à la démocratisation de cette technologie pendant ces dix dernières années. D'après une estimation de Goldman Sachs Global Investment Research [L'A16], le marché de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée devrait dépasser celui de la télévision en 2025 (cf. figure 1.1).

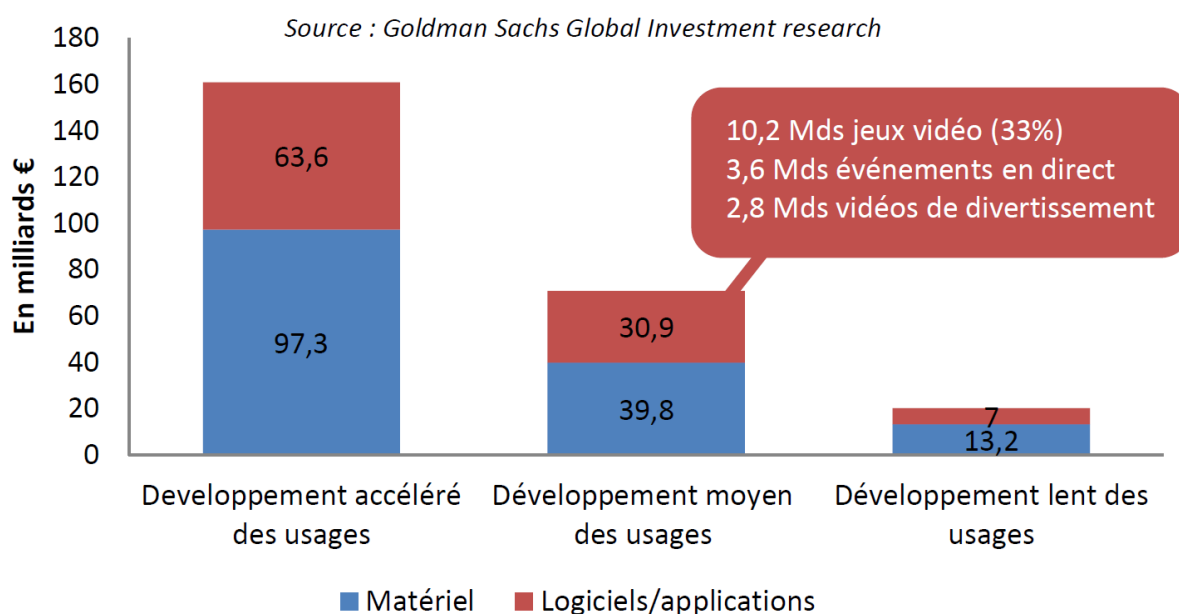


FIGURE 1.1: Estimation du marché de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée en 2025 selon trois scénarios d'usage

Les usages de la réalité virtuelle pour l'apprentissage humain remontent aux années 90 [Fuc18]. Les trois premiers secteurs impactés ont été la formation professionnelle, le secteur scolaire éducatif et la santé où la réalité virtuelle était utilisée à des fins de rééducation motrice ou comportementale pour les populations souffrant de déficits physiques ou mentaux [Riv03]. Ces dernières années, les usages se sont généralisés aussi bien dans l'innovation des

1. The Project Gutenberg eBook of Pygmalion's Spectacles, by Stanley G. Weinbaum. (s. d.). Consulté 20 août 2020, à l'adresse <http://www.gutenberg.org/files/22893/22893-h/22893-h.htm>

pratiques pédagogiques que dans l'amélioration de l'« expérience-utilisateur » des apprenants. D'après Burkhardt [Bur03], il existe deux grands types d'usage de la réalité virtuelle pour la formation : d'une part, les environnements de réalité virtuelle destinés aux apprenants et proposant ainsi une interaction didactique individuelle, voire en groupe et à distance ; d'autre part, les environnements de réalité virtuelle destinés aux formateurs utilisés pour animer une formation. Pour Fuchs [Fuc18], l'utilisation de la réalité virtuelle dans la formation introduit une grande flexibilité dans les possibilités de présenter l'information aux apprenants selon de multiples formats et points de vue, elle introduit les activités sensorimotrices (corporelles), en lien étroit avec les activités cognitives dans les processus d'apprentissage ; elle permet d'objectiver l'évolution des acquis par la mesure, l'analyse et le suivi de l'activité et joue un rôle fondamental dans l'objectivation des difficultés et des améliorations par la possibilité de rejoux (répétition d'une tâche dans l'environnement virtuel) de la performance.

Dans le champ spécifique de la formation à distance, les chercheurs s'intéressent de plus en plus à l'utilisation de la réalité virtuelle. Il ressort des premiers travaux que cette technologie offre une nouvelle façon d'apprendre, de collaborer et de se socialiser [MMBM04]. Elle permet de simuler des situations d'apprentissage semblables à celles réalisées dans une formation présentielle (cours magistral, manipulation des objets dans un laboratoire, etc.) [MMBM04, qChZxJ16] et donne aux utilisateurs une liberté d'interactivité avec la caractéristique d'immersion [AETAA12]. De plus, elle offre la possibilité d'assister les apprenants en utilisant un tuteur intelligent et favorise l'entraide entre apprenants [Fuc18].

Cependant, la formation dans un environnement de réalité virtuelle est souvent considérée comme une solution technique et elle tend généralement à oublier les besoins des apprenants et leur satisfaction à l'égard de l'expérience d'apprentissage [AETAA12]. Ceci se traduit par exemple par le fait que les approches de conception des environnements de réalité virtuelle pour la formation à distance ne prennent pas (ou peu) en compte la spécificité de la distance. Cette distance représente pourtant l'une des caractéristiques principales des modalités propres à la formation à distance et peut être considérée comme le fondement de la relation pédagogique [Jac93]. Du point de vue des utilisateurs (apprenants et enseignants), la distance constitue très souvent un obstacle dans l'atteinte des objectifs pédagogiques [Dus14, Pui19] et dans certains cas, peut conduire à l'abandon [Dus14]. L'objet de nos travaux consiste donc à étudier comment la réalité virtuelle peut être utilisée pour améliorer l'expérience des utilisateurs dans un dispositif de formation à distance. Nous nous penchons notamment sur les questions liées à la distance. Ainsi, notre approche consiste dans un premier temps à formaliser une démarche de conception des environnements de réalité virtuelle spécifique à la formation à distance. Cette démarche se base sur le modèle à trois niveaux de la réalité virtuelle présenté par la communauté

scientifique française [Fuc18, Bou09] (i.e. le niveau sensorimoteur, le niveau cognitif et le niveau fonctionnel), la conception centrée opérateur humain [fS19] et intègre les recommandations des méthodologies de conception des environnements de réalité virtuelle existantes, les résultats des travaux sur la formation à distance et les composants de la distance. Dans un second temps, nous utilisons notre expérience issue de la conception et la réalisation d'un environnement de réalité virtuelle collaboratif, les recommandations des travaux existants et les évaluations des utilisateurs finaux pour proposer des spécifications d'un environnement de réalité virtuelle collaboratif destiné à la formation à distance. Ces spécifications prennent en compte d'une part les formateurs dans la préparation, l'exécution et l'évaluation d'une situation d'apprentissage collaborative et d'autre part les apprenants dans la réalisation de la tâche d'apprentissage dans l'environnement de réalité virtuelle collaboratif. Enfin nous utilisons une démarche expérimentale pour évaluer la coprésence et le rapprochement des apprenants dans l'environnement de réalité virtuelle collaboratif pendant l'exécution d'une situations d'apprentissage collaborative. Nous montrons ainsi comment la représentation des avatars dans un environnement de réalité virtuelle collaboratif peut agir sur le sentiment de coprésence entre apprenants et les rapprocher.

Pour aborder nos travaux, nous présentons dans le chapitre 2 le contexte historique et le concept de la réalité virtuelle ainsi que les notions-clés qui lui sont associées. Dans le chapitre 3, nous présentons le contexte historique et le concept de la formation à distance en mettant l'accent sur les principaux courants épistémologiques. Dans le chapitre 4, nous exposons la problématique de notre étude en réalisant un état de l'art de la littérature scientifique sur les apports de la réalité virtuelle pour la formation en général. Nous présentons également dans ce chapitre les premiers résultats des travaux dans le champ spécifique de la formation à distance. Dans le chapitre 5, nous abordons notre approche de conception des environnements de réalité virtuelle. Le chapitre 6 est consacré aux spécifications fonctionnelles et techniques ainsi qu'à la mise en place d'un environnement virtuel collaboratif destiné à la formation à distance. Enfin dans le chapitre 7, nous présentons un retour d'expérience sur la mise en situation des apprenants dans notre environnement de réalité virtuelle collaboratif et analysons l'impact de celle-ci sur l'expérience-utilisateur des apprenants.

Note : les définitions en anglais reprises dans ce document ont été traduites en français par nos soins.

Chapitre 2

LA RÉALITÉ VIRTUELLE ET SES CONCEPTS-CLÉS

L'expression RV n'est plus un mystère pour le grand public. Elle « *oscille entre fantasme et technologie, entre rêve et réalité* » [Fuc18]. Dans ce chapitre, nous retraçons le contexte historique de la RV depuis ses origines jusqu'à nos jours. Ensuite nous définissons le cadre conceptuel ainsi que les notions-clés utilisées dans nos travaux. La dernière partie de ce chapitre présente deux autres technologies qui se rapprochent de la RV, la Réalité Augmentée (RA) et la Réalité Mixte (RM).

2.1 La réalité virtuelle

2.1.1 Contexte historique de la RV

L'idée de la RV est suggérée pour la première fois par l'écrivain Stanley Grauman Weinbaum en 1935. Il s'agit d'une science-fiction¹ décrivant des lunettes permettant à celui qui les porte d'accéder à un univers virtuel dans lequel il peut interagir, toucher et sentir.

En 1957, le réalisateur Morton Heilig crée le premier visiocasque² connu sous le nom de « Telesphere Mask » [Hei60]. Son apparence était semblable aux visiocasques actuels (cf. figure 2.1). L'objectif de cette invention était de proposer une sensation de réalité à l'aide d'une vision périphérique complète grâce à une prise de vue légèrement décalée pour chaque œil.

En 1962, Morton Heilig crée un nouveau prototype dans la continuité de son idée. Ce nouveau prototype est appelé Sensorama [Hei62] (cf. figure 2.2). Il visait à augmenter le réalisme expérimenté lors du visionnage de films et était muni d'un dispositif permettant de diffuser une image en grand-angle, le son était diffusé en stéréophonie, l'appareil disposait d'un siège vibrant et de 9 ventilateurs pouvant servir à diffuser des senteurs en plus de l'air. Il proposait une immersion dans des films en utilisant les sens visuel, auditif et olfactif pour retranscrire les différentes scènes le plus fidèlement au spectateur.

En 1965, Sutherland [Sut65] publie « The Ultimate Display », qui explorait la possibilité d'un système informatique composé de graphiques interactifs, avec son, retour de force, odeur et goût [MG99, ALF17]. En 1968, il crée « l'épée de Damoclès » [Sut68] (cf. figure 2.3). Le casque était très lourd et nécessitait un bras robotisé pour l'utiliser. Il intégrait la fonction d'affichage

1. Une science-fiction est un genre littéraire et cinématographique qui invente des mondes, des sociétés et des êtres situés dans des espaces-temps fictifs (souvent futurs), impliquant des sciences, des technologies et des situations radicalement différentes. Source : <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/science-fiction/71469>

2. Visiocasque : Appareil en forme de casque, muni d'écouteurs et de petits écrans vidéo s'adaptant sur les yeux, que l'on utilise pour accéder à un environnement virtuel. Source : <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/visiocasque/82196>

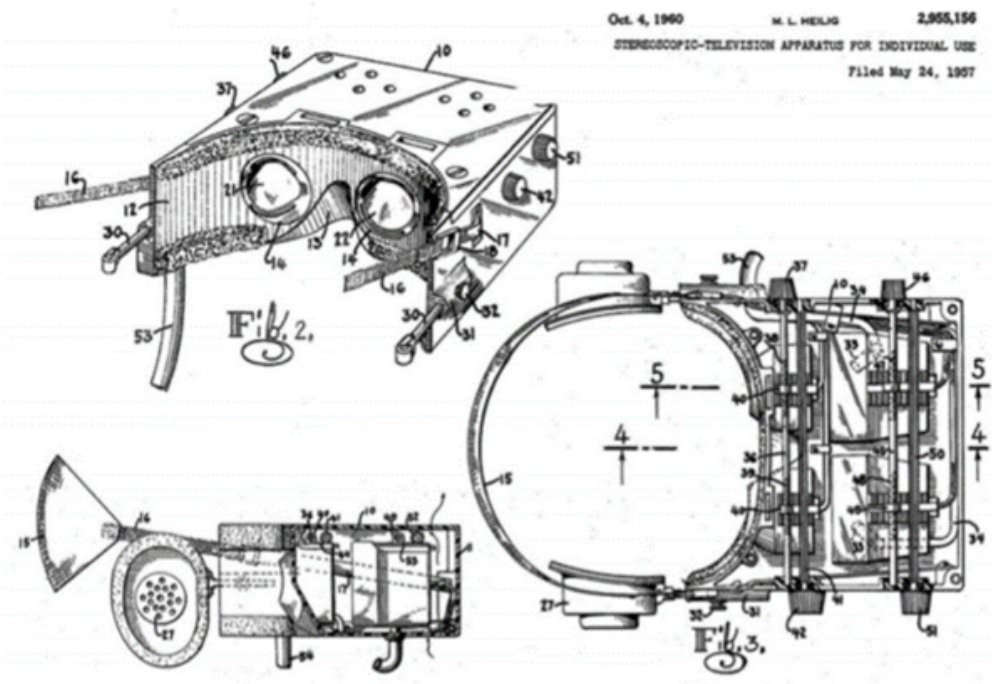


FIGURE 2.1: Le Telesphere Mask de Morton Heilig (Stereoscopic-television apparatus for individual use, U.S. Patent n° 2,955,156, 4 oct. 1960)



FIGURE 2.2: Une affiche vantant le Sensorama. Source : <http://www.telepresence.com>

d'images tridimensionnelles, un champ de vision à 360° et l'interaction entre l'utilisateur et le système (par exemple la possibilité de s'adapter à ce que l'observateur voit en fonction de son

comportement dans le monde réel).

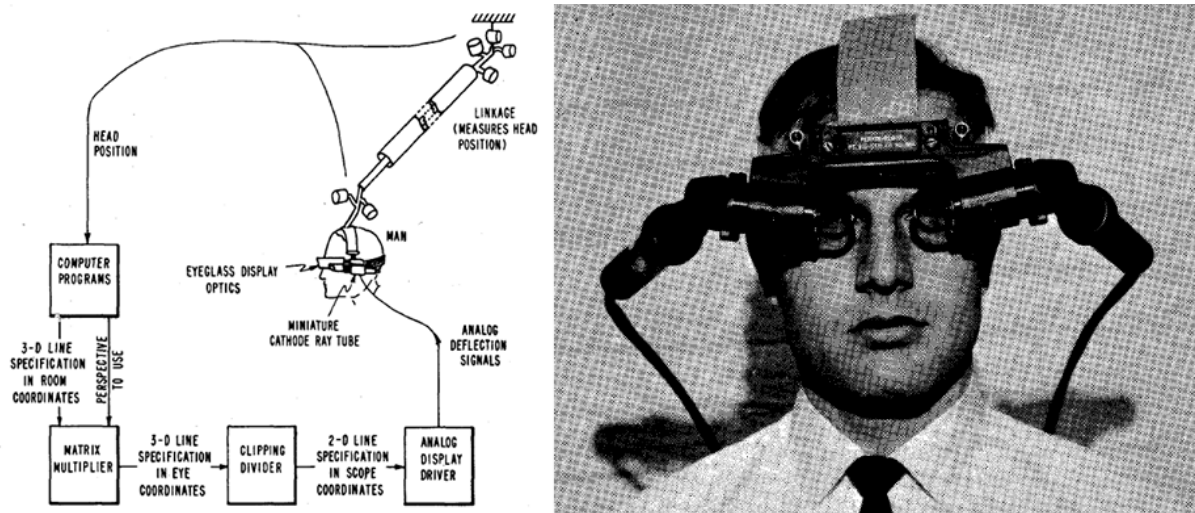


FIGURE 2.3: L'épée de Damoclès [Sut68]

En 1971, le premier prototype du système de retour de force nommé GROPE est réalisé à l'University of North Carolina. Ce système permettait aux utilisateurs de ressentir une force informatiquement simulée [MG99, Sut68]. Un exemple d'appareil de retour de force est présenté sur la figure 2.4. GROPE visait à combiner l'affichage haptique et l'affichage visuel pour produire son système. Le dernier prototype de GROPE (cf. figure 2.5) était composé d'un bras monté au plafond couplé à un ordinateur, et a été utilisé par des chimistes pour une procédure d'amarrage médicament-enzyme.

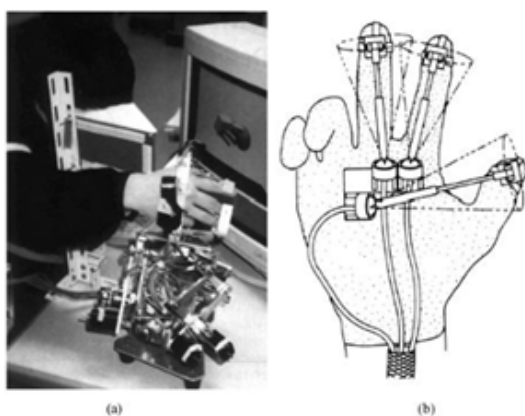


FIGURE 2.4: Gant à retour de force : (a) Manipulateur principal, (b) Structure de retour de force pour le gant de données

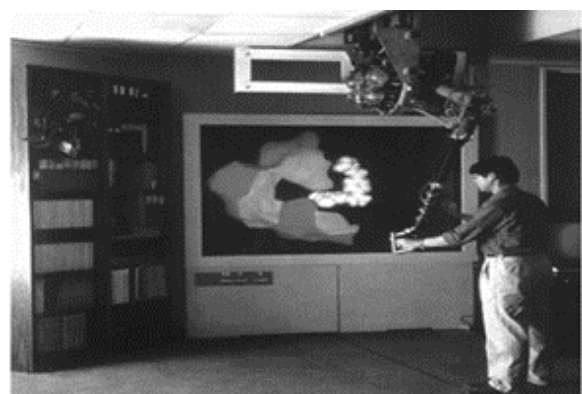


FIGURE 2.5: Une affiche ventant le Sensorama. Source : <http://www.telepresence.com>

En 1975, Myron Krueger invente le VIDEOPLACE, un « environnement conceptuel, sans existence » [MG99]. Le VIDEOPLACE disposait d'un système de captation par caméra et de retranscription en images par projection sur écrans. Le dispositif permettait de recréer les images des personnes se trouvant dans une ou plusieurs pièce(s) par captation sans besoin d'aucun matériel particulier. L'utilisateur pouvait donc interagir avec les objets des autres participants.

En 1982, Thomas Furness, des laboratoires de recherche médicale Armstrong de l'US Air Force, développe le simulateur de systèmes aéroportés à couplage visuel nommé VCASS (Visually Coupled Airborne Systems Simulator). Il s'agissait d'un simulateur de vol avancé. Le pilote de chasse portait un visiocasque qui augmentait la vue hors de la fenêtre par les graphiques décrivant le ciblage ou les informations de trajectoire de vol optimale.

En 1984, le centre de recherche Ames de la NASA crée le Virtual Visual Environment Display (VIVED) [FMHR87, Sut65] pour permettre à un utilisateur de décrire son monde numérique pour d'autres personnes et de le voir comme un espace 3D. VIVED fut conçu avec un visiocasque monochrome stéréoscopique.

En 1985 et 1988, la société VLP fabrique respectivement le DataGlove et le visiocasque Eyephone. Il s'agit du premier matériel de RV disponible dans le commerce pour le grand public. DataGlove était utilisé comme périphérique d'entrée. Eyephone était une unité d'affichage montée sur la tête et utilisée pour donner aux utilisateurs un sentiment d'immersion.

En 1989, Fake Space Labs crée le Binocular Omni-Orientation Monitor (BOOM). Il s'agissait d'une petite boîte contenant deux moniteurs correspondant à chaque oeil. Dans le système BOOM, l'utilisateur utilisait la boîte fixée sur ses yeux pour se déplacer dans le monde virtuel, et un bras mécanique mesurait la position et l'orientation de la boîte (cf. figure 2.6).

En 1990, le Virtual Wind Tunnel est développé à l'aide de BOOM et de DataGlove à la NASA et permet d'observer et d'étudier les champs d'écoulement. Ce type de dispositif aidait les scientifiques via un DataGlove à entrer et manipuler des flux de fumée virtuelle dans le flux d'air autour du modèle numérique d'un avion ou d'une navette spatiale. En se déplaçant (à l'aide d'une technologie d'affichage BOOM), ils pouvaient observer et analyser le comportement dynamique du flux d'air et trouver facilement les zones d'instabilité.

En 1992, le CAVE Automatic Virtual Environment (CAVE) est inventé par 3 chercheurs du Chicago Electronic Visualization Laboratory de l'University of Illinois [MG99]. Il s'agit d'un

système de RV et de visualisation scientifique qui utilise des images stéréoscopiques sur les murs de la pièce au lieu d'utiliser un visiocasque. Cette approche garantit une qualité et une résolution supérieures des images visualisées, ainsi qu'un champ de vision plus large que celui des systèmes basés sur les visiocasques. Dans le CAVE, des projections sur les six surfaces de la pièce permettent à l'utilisateur de se retourner et de voir dans toutes les directions. Cela permet à l'utilisateur d'interagir avec l'Environnement Virtuel (EV), ayant ainsi une impression d'immersion totale (cf. 2.7).



FIGURE 2.6: BOOM



FIGURE 2.7: CAVE (source : Wikipédia)

Ces dernières années, la RV s'est démocratisée, notamment par l'arrivée des casques accessibles au grand public. Ainsi la société Oculus VR spécialisée dans la RV est créée en Californie en 2012 et rachetée par Facebook en 2014. Oculus commercialise les casques Oculus

Rift, Oculus Go et depuis 2019 Oculus QUEST. En 2016, les sociétés HTC et Valve collaborent pour créer le visiocasque HTC VIVE. Google met sur le marché les visiocasques « low-cost » tels que Google Cardboard en 2014 et Google Daydream en 2016. Ces casques sont réalisés directement à partir de l'écran et des capteurs d'orientation des smartphones [Fuc18]. Oculus développe un casque similaire en collaboration avec Samsung en 2015 (Samsung Gear VR) et Sony crée la PlayStation VR pour la Playstation en 2016.

2.1.2 Cadre théorique de la réalité virtuelle

Le terme « réalité virtuelle » correspond à la traduction littérale de l'anglais « virtual reality » proposée par VPL Research, entreprise spécialisée dans les dispositifs d'immersion, à des fins de communication et de marketing lors d'un salon professionnel [Des06]. La littérature scientifique propose des définitions qui, bien que souvent différentes, se retrouvent sur un certain nombre de notions-clés [Bou09]. Nous allons brièvement passer en revue les principales définitions pour extraire et définir les concepts-clés nécessaires à notre réflexion. Précisons que nous soutenons l'affirmation de Fuchs selon laquelle la RV ne pourrait être réduite au visionnage d'une vidéo 360° à travers un visiocasque [Fuc18].

Burdea et Coiffet [BC03] intègrent trois notions principales dans la définition de la réalité virtuelle : l'immersion (cf section 2.1.2.2), l'interaction (cf section 2.1.2.1) et l'imagination. Pour ces auteurs, un système de RV est « *une interface qui implique une simulation en temps réel et des interactions à travers les multiples canaux sensoriels de l'homme (vision, audition, toucher, odorat, goût)* ». En plus de l'immersion et l'interaction communément appelées I^2 , dans la littérature scientifique française, ces auteurs pensent que l'imagination serait nécessaire à l'utilisateur pour interpréter son interaction avec l'EV. Fuchs critique cette définition qui positionne l'imagination au même titre que l'immersion et l'interaction [FMB06].

Pour Bell et Fogler [BF95], la notion de crédibilité doit être intégrée dans la définition de la réalité virtuelle. En d'autres termes, dans un monde virtuel idéal, un utilisateur serait complètement incapable de déterminer s'il vit une simulation informatique ou « la vraie chose ». D'après ces auteurs, les systèmes de RV utilisent généralement des graphiques tridimensionnels haute vitesse et de haute qualité, de l'audio spatialisé et du matériel spécialisé tel que des visiocasques ou des salles immersives de type CAVE et des vêtements câblés pour atteindre des degrés élevés de réalisme et de crédibilité. Pour eux, la réalité virtuelle est donc « *une interface informatique caractérisée par des degrés élevés d'immersion, de crédibilité et d'interaction, et avec pour objectif de faire croire à l'utilisateur, autant que possible, qu'il se trouve réellement dans l'environnement généré par ordinateur* ».

Zeltzer [Zel92] quant à lui propose une autre taxonomie à trois dimensions de la RV : autonomie-interaction-présence. Dans cette définition, l'autonomie désigne le comportement des entités virtuelles présentes dans l'environnement virtuel, l'interaction est la capacité d'interagir avec ces entités et l'environnement, et la présence est associée à la simulation sensorielle [Bou09]. Bien que Bouvier apprécie l'idée de peupler l'environnement d'entités autonomes dont les réactions pourront être attendues ou surprenantes, il trouve regrettable le fait que la présence soit assimilée à la stimulation sensorielle et pourrait donc être confondue avec l'immersion. La notion de la présence est traitée dans la section 2.1.2.3 de ce document.

Quéau [P.93] substitue la RV aux mondes virtuels. Pour l'auteur, un monde virtuel est « une base de données graphique interactive, explorable et visualisable en temps réel sous forme d'images de synthèse tridimensionnelles de façon à donner le sentiment d'une immersion dans l'image ». Contrairement aux autres définitions qui adoptent une approche anthropocentrée (centrée sur l'humain) [Fuc18] (cf. figure 2.8), la définition de Quéau adopte une approche technocentrée [Baz05] (centrée sur la technologie).

Bouvier [Bou09] propose dans ses travaux une autre définition impliquant le sentiment de présence. Pour cet auteur, « *la réalité virtuelle est une expérience médiatisée qui plonge un ou plusieurs utilisateurs au cœur d'un environnement artificiel dans lequel l'utilisateur peut ressentir et interagir en temps réel via des interfaces sensorimotrices. L'utilisateur juge crédible l'expérience, accepte de se prendre au jeu et en réponse ressent un sentiment de présence* »..

Pour terminer, notons que la communauté scientifique française s'accorde autour des deux définitions suivantes [Bou09] de la RV :

- **D'un point de vue fonctionnel**, « *la finalité de la réalité virtuelle est de permettre à une personne (ou à plusieurs) de vivre une activité sensorimotrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement et qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel* » [Fuc18]. Cette définition fait abstraction de l'aspect matériel au profit de l'utilisateur. C'est ce que Fuchs appelle une approche dirigée vers l'humain (anthropocentrée) (cf figure 2.8). Pour lui, dans toute application de RV, l'utilisateur perçoit, décide et agit dans l'EV. C'est ce qu'il appelle la boucle de « perception, décision, action » (cf. figure 2.9).
- **D'un point de vue technique**, « *la réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales (voir section 2.1.2.2) en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D.* »

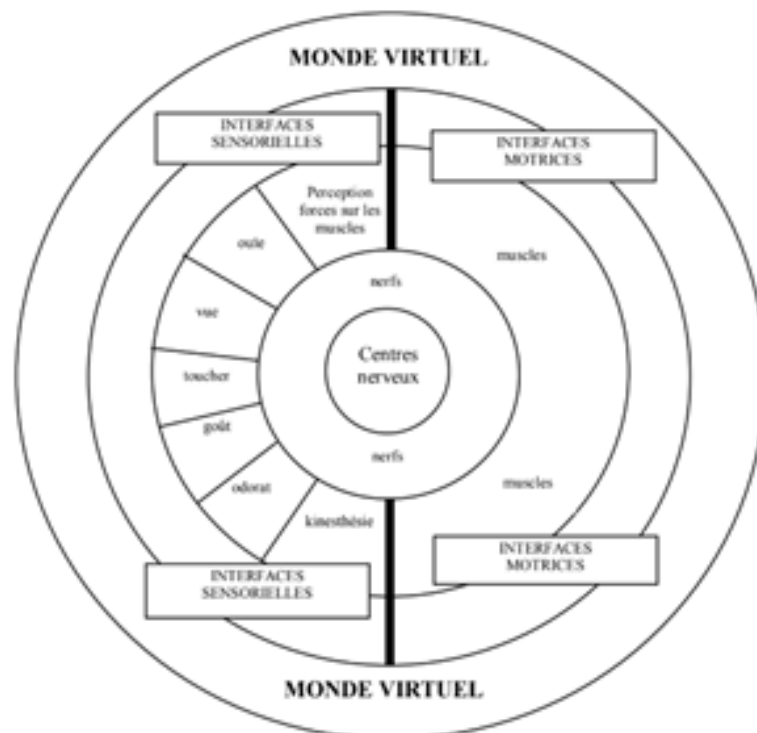


FIGURE 2.8: Schéma anthropocentrique de la perception du monde virtuel par l'homme

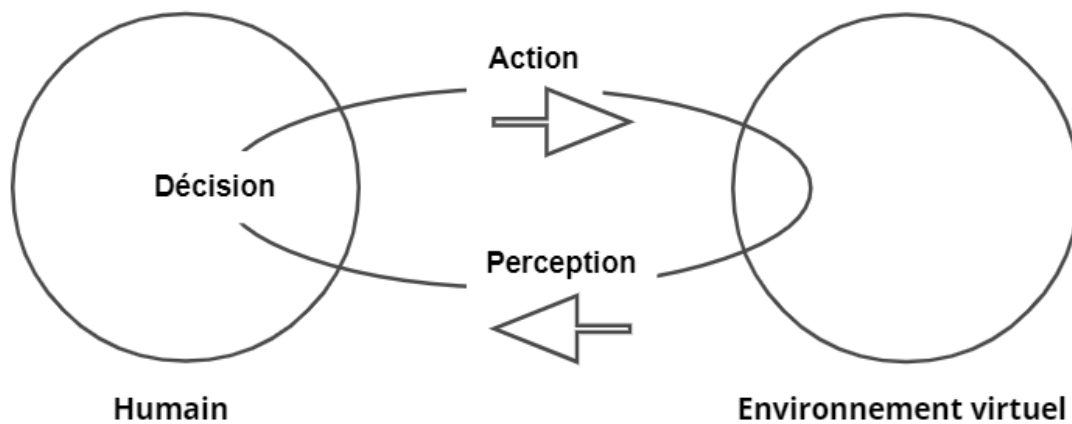


FIGURE 2.9: Boucle perception-décision-action [Fuc18]

Bien que la définition fonctionnelle (de la communauté scientifique française) de la RV intègre uniquement les notions d'immersion et d'interaction, il est à notre avis important d'y associer la notion de présence qui trouve toute son utilité dans un contexte d'apprentissage. Pour les besoins de nos travaux, nous adoptons donc la définition de Bouvier.

Ainsi, à travers ces différentes définitions, plusieurs concepts-clés apparaissent comme es-

sentiels pour définir un système de réalité virtuelle. Nous retenons les concepts de l'Interaction, l'Immersion, la Présence, les Environnements virtuels pour les besoins de nos travaux. La suite de ce chapitre présente chacun de ces concepts. Nous présentons aussi le concept d'Avatar qui est généralement utilisé pour représenter les utilisateurs dans un Environnement de Réalité Virtuelle (ERV) collaboratif et le concept de Flow.

2.1.2.1 L'immersion en réalité virtuelle

Le concept d'immersion est très utilisée dans les travaux en RV et représente l'un des aspects principaux du domaine. Cependant, cette notion est définie selon deux approches de pensée différentes.

Le premier courant, que nous nommerons « approche subjective », présente l'immersion comme une expérience subjective vécue par un utilisateur. Ce courant est soutenu par Witmer et Singer [WS98a], deux chercheurs en sciences sociales et comportementales. D'après ces auteurs, l'immersion représente « *un état psychologique qui se caractérise par la perception de soi comme étant enveloppé par un environnement virtuel qui fournit un flux continu de stimuli et d'expériences, comme étant inclus dans et en interaction avec celui-ci* ». Pour ces auteurs, il existe quatre facteurs qui conditionnent l'immersion d'un utilisateur : (1) l'isolation de l'environnement physique (2) la perception de l'inclusion de soi dans l'environnement virtuel (3) des modes d'interactions et de contrôles naturels (4) la perception de son propre mouvement. D'après Bouvier [Bou09], le défaut majeur de ce courant est qu'il situe l'immersion à un niveau psychologique et, de ce fait, introduit une confusion avec le sentiment de présence. Pour l'auteur, l'immersion ne saurait être un sentiment, car le sentiment est subjectif.

Le second courant que nous nommerons « approche objective » présente l'immersion comme une expérience quantifiable, dépendante de la technologie. Cette approche est soutenue par Slater *et al.* [SU93]. Pour ces auteurs, l'immersion définit dans quelle mesure les systèmes de restitution sont capables de délivrer une illusion de la réalité aux sens de l'utilisateur qui soit exclusive, large, englobante et juste. Burkhardt *et al.* [Bur03] rejoignent ce courant lorsqu'ils décrivent l'immersion comme « *l'exposition d'un utilisateur à un environnement virtuel à l'aide de dispositifs occultant en partie la perception de son environnement alentour, pour afficher en lieu et place une image du monde virtuel* ». Pour les auteurs, le degré d'immersion se caractériserait à minima par : (1) le sous-ensemble des modalités mises en œuvre dans l'interaction ; (2) les propriétés (degré de complétude, qualité, paramètres du signal, etc.) des dispositifs d'interaction pour chacune des modalités visées ; (3) la cohérence interne et la latence globale de l'information et des réactions délivrées en temps réel par le système ; (4) les

propriétés de l'environnement physique dans lequel se déroule l'expérience. Bouvier [Bou09] qui soutient aussi ce courant définit plusieurs conditions à remplir pour disposer d'une immersion de qualité : (1) l'ensemble des sens de l'utilisateur est stimulé [Ste00]; (2) les interfaces immersives respectent les fréquences de perception des sens de l'utilisateur (au minimum 25 Hz pour le visuel et 10kHz pour l'haptique) (3) le champ de perception est omnidirectionnel (immersion du regard en 360° et restitution sonore spatiale) (4) l'immersion est égocentrique (perception de l'utilisateur à la première personne, adaptation des dispositifs de restitution sensorielle à la position et l'orientation des récepteurs de l'utilisateur, capacité de suivre finement les mouvements de l'utilisateur); (5) la cohérence entre les stimuli est maintenue (maintien d'une cohérence spatiale et temporelle entre les différentes modalités décrivant l'environnement). Enfin pour Fuchs [Fuc18], lorsqu'on utilise un visiocasque, l'immersion est dite totale si : (1) la représentation du corps du sujet est correctement réalisée en temps réel dans l'environnement virtuel; (2) l'immersion visuelle est totale, c'est-à-dire réalisée avec un visiocasque ayant un champ de vision aussi grand que celui du sujet immergé (3) l'environnement virtuel est spatialement égale à l'environnement réel pour que le sujet ait les mêmes sensations proprioceptives de son corps (musculaire et kinesthésique) et qu'ainsi, tous ses sens créent un environnement cohérent, fusion de l'environnement réel et de l'environnement virtuel, car le corps du sujet est toujours dans l'environnement réel.

A notre avis, l'immersion ne doit pas être confondue avec la présence (qui est une expérience subjective), ainsi nous adoptons l'approche objective de l'immersion.

2.1.2.2 L'interaction en réalité virtuelle

L'interaction 3D est un autre concept-clé de la RV. Ouramdane *et al.* [OOM09] la définissent comme « *un langage commun entre l'humain et l'environnement virtuelle* ». Ce langage correspond à l'ensemble des actions et réactions réciproques entre l'homme et l'ordinateur par l'intermédiaire d'interfaces sensorielles, d'interfaces motrices et de techniques d'interaction [Ste06]. Dans la même lancée, Fuchs [Fuc18] déclare que cette interaction est possible grâce aux interfaces matérielles de la réalité virtuelle encore appelées « interfaces comportementales », car elles exploitent les comportements humains. Ces interfaces sont composées d'interfaces sensorielles (visuelles, tactiles, sonores) qui informent l'utilisateur par ses sens de l'évolution du monde virtuel, d'interfaces motrices (manettes, gants de données, tapis de marche, etc.) qui informent l'ordinateur des actions motrices de l'homme sur l'EV et d'interfaces sensorimotrices (interfaces à retour de force) qui informent dans les deux sens (cf. figure 2.10).

Il existe plusieurs techniques d'interaction 3D en RV qui donnent aux utilisateurs le pouvoir de réaliser différentes tâches au sein d'un monde virtuel [OOM09]. Quelques-unes de ces techniques sont :

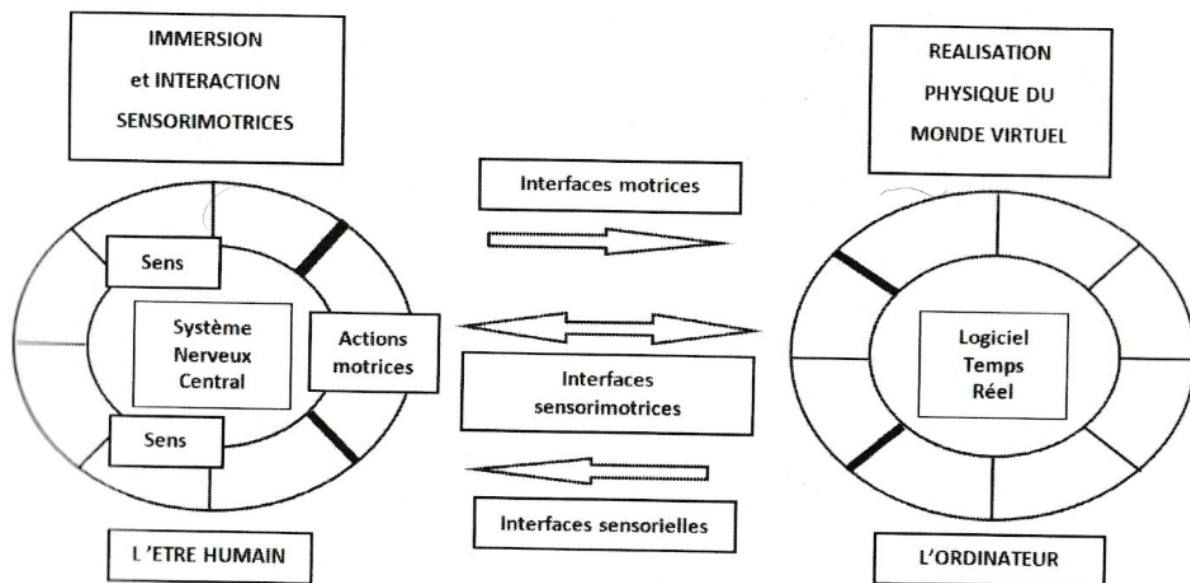


FIGURE 2.10: Niveau d'immersion et d'interaction sensorimotrice de l'interfaçage comportemental [Fuc18]

- La **navigation (ou le déplacement)** qui correspond à la capacité de bouger, de se déplacer dans l'ERV. Cette tâche permet aux utilisateurs de faire évoluer leur position dans l'ERV. Le déplacement se décompose généralement en deux parties distinctes [Fuc18] : la composante sensorimotrice qui permet le déplacement effectif d'un point A vers un point B et la composante cognitive appelée recherche d'itinéraire qui permet aux utilisateurs de se repérer dans l'environnement et de choisir une trajectoire pour se déplacer. D'après Bowman *et al.* [BKH97], plusieurs facteurs doivent être pris en compte dans la conception du déplacement. Il s'agit de la vitesse de déplacement, la précision d'exécution, la conscience spatiale de l'utilisateur de sa position et de son orientation dans l'environnement virtuel pendant et après la navigation, la facilité d'apprentissage (la capacité d'un utilisateur débutant à s'approprier la technique de navigation), la facilité d'utilisation, la capacité de l'utilisateur à collecter des informations sur l'environnement pendant l'expérience virtuelle, la présence virtuelle, le confort de l'utilisateur. D'après Fuchs [Fuc18], une autre notion importante à prendre en compte sur le déplacement est le mode de contrôle de l'utilisateur. Ainsi, on distingue le déplacement par contrôle continu qui est un déplacement continu, contrôlé en temps réel et en permanence par l'utilisateur, ses actions étant immédiatement retranscrites sur son déplacement ; le déplacement par pointage qui peut être soit un déplacement continu, soit un déplacement par saut, contrôlé par l'utilisateur en temps réel par pointage par l'utilisateur qui fournit des positions clés (par exemple la téléportation représentée sur la figure 2.11) ; le déplacement planifié qui est aussi un déplacement continu, mais n'est plus contrôlé à

temps réel par l'utilisateur. Ce dernier mode est constitué de deux phases : une phase de planification du déplacement par le concepteur et une phase d'exécution du déplacement par le système. Le déplacement par contrôle continu utilise la marche (dans un grand espace) ou la simulation de la marche (marche sur place avec un tapis roulant et analyse des mouvements), les postes de conduite (i.e. une métaphore exploitant les habilités développées par les utilisateurs concernant la conduite d'un véhicule), et le contrôle gestuel (utilisation de la main avec une manette pour pointer une direction, contrôle des déplacements à l'aide des mouvements de la tête, etc). Dans le contrôle par pointage, l'utilisateur désigne uniquement sa position cible et l'ordinateur calcule le chemin entre la position actuelle et la position cible.

- La **sélection**, encore appelée tâche d'acquisition d'une cible [ZBM94], correspond à la désignation d'un objet ou d'un ensemble d'objets afin d'accomplir un objectif donné au sein de l'EV [BKH97]. le processus de sélection en RV s'inspire souvent de la sélection dans le monde réel. Selon Ouramdane *et al.* [OOM09], la sélection regroupe deux sous-tâches à savoir la désignation de l'objet et la validation de la sélection. D'après Balaa *et al.* [BRCD18], la sélection des objets dans un EV 3D est confrontée à trois problèmes majeurs : le problème de densité lorsque les objets sont proches les uns des autres (erreurs de pointage fréquentes) ; le problème d'occultation lorsque l'objet à atteindre est caché (partiellement ou totalement) par les autres objets de la scène (la charge mentale pour retrouver l'objet est plus élevée) ; le problème des déplacements liés à la profondeur, car la majorité des dispositifs d'interaction est conçue pour une utilisation en 2 dimensions et ne propose pas suffisamment de degrés de liberté pour pouvoir interagir correctement avec les 3 dimensions dans l'EV. Les interfaces matérielles de la RV apportent des solutions (partielles ou complètes) à ces problèmes.
- La **manipulation**, qui donne le pouvoir à l'utilisateur de changer les propriétés du monde virtuel dans lequel il a l'illusion d'habiter. Ces propriétés sont, par exemple, la position, l'orientation, la couleur, l'échelle, la forme, l'opacité, la visibilité, la texture, etc. D'après Ouramdane *et al.* [OOM09], la manipulation peut être directe, permettant ainsi à l'utilisateur d'agir directement sur l'objet appartenant à l'environnement virtuel, ou bien indirecte pour lui permettre d'agir sur les composantes du monde virtuel par l'intermédiaire d'entités graphiques (boutons, menus 3D) ou matérielles. Pour manipuler les objets distants dans l'EV, il existe plusieurs techniques classées en deux catégories [BH99] : les techniques d'extension du bras qui consistent à faire croître le bras de l'utilisateur à la longueur souhaitée dans l'ERV et les techniques de lancer de rayons qui utilisent un rayon lumineux virtuel pour saisir un objet, la direction du rayon étant spécifiée par la main de l'utilisateur. La tâche de manipulation est liée à la tâche de sélection, car pour manipuler un objet, il faut au préalable le sélectionner.

- Le **contrôle de l'application** qui permet à l'utilisateur de communiquer avec l'application en dehors de l'environnement [Che09]. Il s'agit par exemple des tâches de paramétrage de l'environnement, de l'inscription des utilisateurs à une activité, de l'accès à l'aide, du changement des paramètres de connexion, etc. Bien que cette dernière action soit utile voir indispensable dans certains cas, il ne s'agit pas de notre point de vue d'une interaction dans l'ERV car elle se passe en dehors de l'EV. Dans nos travaux, nous considérons cette tâche comme une fonctionnalité de l'interface homme-machine (cf chapitre 5).

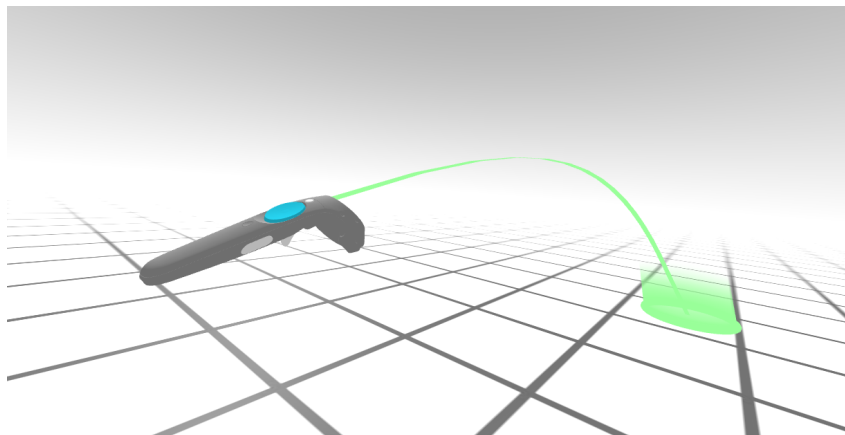


FIGURE 2.11: Téléportation

2.1.2.3 La présence en réalité virtuelle

Dans la littérature scientifique, la notion de présence a d'abord été utilisée dans le domaine de la télérobotique. Minsky [MIN80] a été l'un des premiers chercheurs à utiliser le terme téléprésence dans ses travaux sur la simulation en robotique. Pour lui, la téléprésence est le fait de faire exécuter à une machine des actions pilotées par le mouvement d'un corps humain ou d'une partie de corps humain, et ce, le plus fidèlement possible. Il déclare dans ses travaux que le plus gros défi dans le domaine est d'arriver à ressentir le sentiment d'être présent là où se trouve la machine. Sheridan [She92] quant à lui s'est intéressé à cette même notion de présence, mais dans des environnements virtuels. Pour lui, il faut faire la différence entre la téléprésence, qui correspond au sentiment d'être physiquement présent avec un objet virtuel sur un site distant de téléopération, et la présence virtuelle qui est le sentiment d'être physiquement présent dans un environnement virtuel, ceci à l'aide de dispositifs visuels, auditifs ou de force.

D'après Bouvier [Bou09], la présence en réalité virtuelle est définie selon trois courants de pensée différents.

- Le premier courant se base sur une approche centrée sur la technologie et considère la présence comme étant le fruit de la stimulation sensorielle. En d'autres termes, la présence dépend de la technologie. Sheridan [She92] s'inscrit dans ce courant lorsqu'il définit la présence comme un sentiment suscité par les environnements virtuels. D'après ce courant, l'immersion sensorimotrice serait donc à l'origine du sentiment de présence. Slater [SU93], Ellis [EI91] et Lombard [LD97] s'inscrivent également dans ce courant ;
- Le second courant se base sur une approche psychologique centrée sur l'humain et considère la présence comme un état psychologique dont l'utilisateur est le principal moteur. Pour ceux qui se rallient à ce courant, la présence est une expérience subjective. Par conséquent, une immersion sensorielle aussi parfaite soit-elle ne saurait à elle seule produire un fort sentiment de présence [Bou09]. Biocca [Bio97] s'aligne sur ce courant de pensée et pour réfuter le courant centré sur la technologie, il déclare « *Si l'immersion sensorimotrice est la clé à l'origine de la présence, alors, comment expliquer le haut niveau de présence ressentie par les lecteurs d'un livre. Les livres présentent un niveau très bas dans tous les facteurs identifiés comme à l'origine de la présence : la qualité de l'immersion sensorielle, la restitution à la première personne et les possibilités de modifier l'environnement* ». ³. Schubert et Crusius [SC02] proposent une vision mixte de la présence effectuant un décalage de la technologie vers l'humain. Pour eux, « *le sentiment de présence ne dépend pas directement de l'immersion mais passe par une représentation cognitive construite à partir des stimulations sensorielles. De ce modèle mental dépendra l'émergence ou non d'un sentiment de présence chez l'utilisateur* » ;
- Le troisième courant se base sur une approche écologique et considère la présence en fonction des actions réalisées par l'utilisateur dans l'environnement. Pour les partisans de ce courant, la présence est équivalente à entreprendre avec succès des actions dans l'environnement [ZJ98].

A notre avis, la présence virtuelle est un sentiment subjectif qui dépend principalement de l'utilisateur, contrairement à l'immersion qui dépend des caractéristiques de l'environnement. Nous nous inscrivons donc dans le courant subjectif de l'immersion et adoptons la définition de Bouvier [Bou09] découlant de sa définition de la RV qui définit la présence comme « *le sentiment authentique d'exister dans un monde autre que le monde physique où notre corps se trouve* ».

Par ailleurs, la littérature scientifique suggère trois dimensions pour évaluer la présence dans un environnement virtuel [Bou09] :

- La **présence environnementale** [Hee92] ou **présence physique** [NB03, Lee04] qui

3. Définition traduite de l'anglais par le réseau Canopé.

intervient lorsque l'utilisateur va être amené à percevoir comme réels les objets du monde virtuel durant son expérience. Elle se traduit par la réaction de l'environnement à la présence d'un utilisateur ainsi que de leurs actions. Heeter donne à titre d'exemple une lumière qui s'allume à l'entrée de l'utilisateur dans une pièce.

- La **présence de soi** [NB03, Lee04] ou **présence personnelle** [Hee92] qui intervient lorsque l'utilisateur perçoit son soi comme faisant partie du monde virtuel. Cette présence se rapproche beaucoup de la présence physique, car être présent physiquement dans un lieu présuppose que son soi y est également. Bouvier [Bou09] précise que les deux dimensions sont fortement corrélées.
- La **présence sociale** qui intervient lorsque l'utilisateur peut interagir avec d'autres utilisateurs dans l'environnement virtuel. Nowak [NB03] définit cette présence comme la capacité perçue du système à connecter plusieurs personnes. Un autre terme associé à la présence sociale est la **coprésence**, c'est-à-dire la connexion psychologique vers et avec une autre personne. Dans le même sens, Youngblut [You03] définit la coprésence comme l'expérience subjective d'être ensemble avec d'autres dans un environnement généré par ordinateur, même lorsque les participants sont physiquement situés dans différents sites. Pour lui, la présence sociale se produit lorsque les utilisateurs sentent qu'une forme, un comportement ou une expérience sensorielle indique la présence d'une autre personne. La quantité de présence sociale est le degré auquel un utilisateur ressent l'accès à l'intelligence, aux intentions et aux impressions sensorielles d'un autre.

Plusieurs modèles de présences sont développés dans la littérature. Bouvier [Bou09] définit par exemple un modèle visant à « *identifier et à organiser les processus sous-jacents menant au sentiment de présence* ».

Le modèle de Lessiter *et al.* [LFKD01] introduit les identifiants de présence suivants : l'impression d'être dans un espace autre que l'espace réel (correspond à la présence personnelle) ; l'implication ou engagement de l'utilisateur dans l'expérience (il s'agit d'un état de forte concentration dans lequel l'utilisateur n'a plus conscience des distractions extérieures, oublie l'environnement réel dans lequel il se situe et ne fait plus attention au temps qui passe) ; le jugement de la validité écologique (il s'agit du réalisme du contenu et l'aspect naturel de l'environnement) ; les effets négatifs induits par le système (il s'agit des effets négatifs que l'utilisateur peut ressentir comme la nausée, la fatigue, les maux de tête etc.).

Le modèle de Schubert *et al.* [SC02] estime que la présence résulte de la construction d'un modèle mental représentant le corps de l'utilisateur évoluant dans l'environnement virtuel. Ce modèle est composé des facteurs suivants : la présence spatiale ; l'implication ; le jugement

du réalisme ; la qualité de l'immersion ; le contenu dramatique ; la conscience des interfaces ; l'exploration de l'environnement ; la prédictibilité.

Le modèle de Wirth *et al.* [WHB⁺07] décrit de bout en bout la présence spatiale. Il s'articule sur 2 niveaux : (i) le premier niveau appelé niveau mental qui représente l'environnement virtuel tel qu'il est perçu par l'utilisateur. Ce niveau est influencé d'une part par les capacités immersives et interactives du média et d'autres part par les expériences préalables de l'utilisateur (le domaine spécifique d'intérêt de l'utilisateur) ; (ii) le second niveau correspond au passage du modèle mental à l'état psychologique de la présence spatiale. Ce second niveau prend en compte l'implication (ou l'engagement) de l'utilisateur et sa suspension consentie de l'incrédulité.

Pour conclure cette partie, nous retenons que : (i) le sentiment de présence en réalité virtuelle est une expérience subjective [Hee92, Bio97, Bou09] ; (ii) le sentiment de présence est évalué suivant trois dimensions, à savoir la présence physique, la présence de soi et la présence sociale ; (iii) plusieurs facteurs dont l'engagement peuvent mener les utilisateurs au sentiment de présence.

2.1.2.4 Les environnements virtuels

Le terme environnement virtuel a été utilisé comme synonyme de la RV au début des années 90 par les chercheurs du Massachusetts Institute of Technology (MIT). Bien que Ellis [EII91] préfère utiliser ce terme à la place de « réalité virtuelle » qui est pour lui critiquable et critiqué, Chellali [Che09] pense que l'utilisation d'environnement virtuel comme synonyme de la RV semble réductrice, car il ne reflète pas exactement les notions les plus importantes de la RV : l'immersion, la présence et l'interaction.

D'après Ouramdane *et al.* [OOM09] un environnement virtuel est considéré comme le lieu suggéré par la RV pour accueillir un ou plusieurs utilisateurs et leur permettre d'accomplir certaines tâches avec l'impression d'être dans un cadre spécifique. En d'autres termes, il s'agit de l'environnement dans lequel l'utilisateur est immergé pendant l'expérience. Il est représenté par un modèle 3D de données réelles ou imaginaires qu'on peut visualiser et avec lesquelles on peut interagir en temps réel [Hac03]. Pour Burkhardt *et al.* [Bur03], les environnements virtuels constituent « *des systèmes interactifs particuliers visant à permettre à un ou plusieurs utilisateurs d'interagir avec la simulation numérique, généralement réaliste, d'objets et de scènes en trois dimensions, par le biais d'un ensemble de techniques informatiques couvrant une ou plusieurs modalités sensorielles* ». L'immersion (dans son approche objective) dépend fortement de la caractéristique de l'environnement virtuel. Ainsi, on distingue plusieurs types d'environnements virtuels (cf. tableau 2.1) en fonction du degré d'immersion qu'ils procurent à l'utilisateur : envi-

ronnement virtuel non-immersif (Non-Immersive Virtual Environment ou NIVE), environnement virtuel semi-immersif (SIVE), ou bien environnement virtuel totalement immersif (FIVE) [Kal93].

Caractéristiques principales	NIVE	SIVE	FIVE
Résolution	Haute	Haute	Basse-moyenne
Échelle (la perception)	Basse	Basse	Haute
Sens de conscience situationnelle (compétences de navigation)	Faible	Moyen	Elevé
Champ de vision	Petit	Moyen	Grand
Décalage	Bas	Bas	Moyen-Haut
Sens d'immersion	Sans-Bas	Moyen-haut	Moyen-haut

TABLE 2.1: Les différentes performances qualitatives des systèmes de RV (traduit depuis [Kal93])

Par ailleurs, il existe généralement deux façons de visualiser les EV [BLD+99] :

- La vue à la première personne qui est la transposition du point de vue des utilisateurs dans une perspective à la première personne [GCAR17]. En d'autres termes, la vue dans l'EV est comme si elle était celle de l'utilisateur. Cette vue est généralement utilisée dans les applications de réalité virtuelle.
- La vue à la troisième personne qui est une transposition du point de vue des utilisateurs dans une perspective à la troisième personne [GCAR17]. Dans ce cas, l'utilisateur contrôle un objet (mannequin) parfois semblable à une personne dans l'EV. Cette vue est beaucoup utilisée dans les EV accessibles sur ordinateur.

2.1.2.5 Le concept du flow

La notion de flow a été théorisée par Csíkszentmihályi [Csi90], professeur de psychologie. L'auteur le définit comme un état de plaisir, de jouissance et de concentration sans aucun effort, le ressenti d'une action sans difficulté. Pour lui, le flow peut être assimilé au sentiment d'être dans « la zone » chez les athlètes, « l'extase » chez les religieux et « un moment de ravissement esthétique » chez les artistes et musiciens. Le flow peut aussi être ressenti dans l'interaction sociale avec autrui si un niveau d'attention est atteint et si l'acteur réussit à trouver une compatibilité entre ses propres buts et ceux de l'autre personne. Il explique que le flow se produit la plupart du temps lors d'une activité favorite, mais également dans des activités telles qu'au travail si la personne est concentrée et si ses compétences permettent de combler les difficultés. Selon l'auteur, lors d'une activité, le flow survient si les objectifs et les réponses nécessaires pour celle-ci sont clairement définis, si le participant peut agir dans cette activité sans se poser de questions ni sur ce qui doit être fait, ni sur la manière de le faire, si les buts prodiguent des

feedbacks immédiats, et si les compétences de la personne sont totalement impliquées dans la réalisation de l'activité. De plus, l'auteur observe qu'il est rare d'expérimenter le flow lors d'une activité passive (par exemple regarder la télévision). Il définit enfin la zone de flow (voir figure 2.12) comme un espace optimal dans l'expérience entre la difficulté et les compétences des utilisateurs. En d'autres termes, si l'activité à réaliser dans l'expérience est trop difficile par rapport aux compétences, l'utilisateur risque de sortir de la zone de flow et ressentir de l'anxiété, de la frustration. À l'inverse, si l'activité est trop facile et ne sollicite pas les compétences, l'utilisateur va perdre son intérêt et sortir de la zone de flow pour tomber dans l'ennui.

D'autres travaux [Che07] portent sur les moyens d'augmenter l'expérience interactive de toute technologie pour le plus grand nombre d'utilisateur par le flow, en soulignant que le flow peut être maintenu si l'activité met en équilibre la difficulté des tâches à accomplir et les compétences nécessaires à l'utilisateur pour les réaliser.

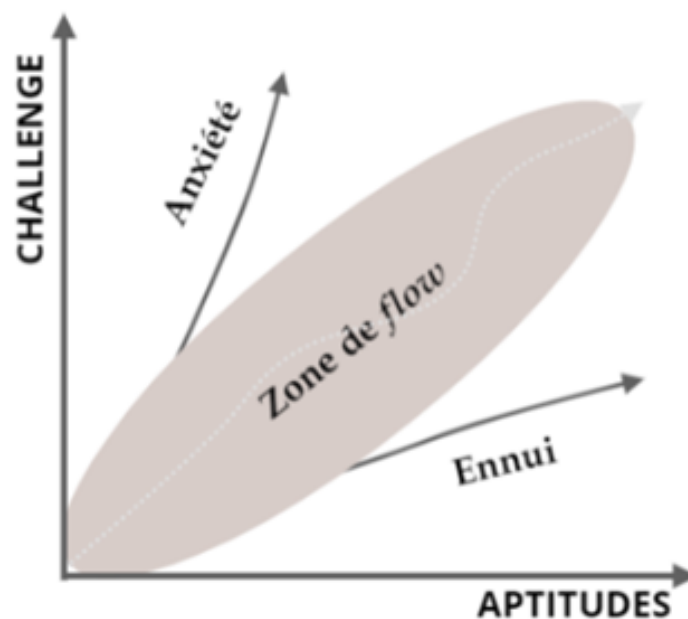


FIGURE 2.12: Zone de flow [Csi90]

2.1.2.6 Les avatars virtuels

Pour terminer cette section, nous proposons de nous pencher sur la question des avatars. Une définition simple est proposée par Fuchs dans son livre sur la théorie de la réalité virtuelle [Fuc18]. Pour lui, un avatar est un personnage représentant un usager immergé dans l'ERV. En d'autres termes, l'utilisateur immergé est remplacé par un personnage virtuel. Cette définition est basée sur une vue à la première personne de l'ERV (vue égocentrique). Ainsi, la caméra représente les yeux de l'utilisateur immergé. Il peut voir, si le système le permet, certaines

parties du corps de l'avatar virtuel, notamment celles qui lui permettent de réaliser certaines actions motrices (par exemple les mains virtuelles). Les mouvements de l'avatar sont contrôlés par l'utilisateur immergé, mais il existe des situations dans lesquelles la technologie pourrait inverser cette relation de sorte qu'un avatar affecte le comportement moteur de l'utilisateur sans qu'il le remarque [GFCB+20]. Pour Gonzalez *et al.* [GFCB+20], chaque fois que le corps virtuel ne se superpose pas à leur corps physique, les utilisateurs ont tendance à suivre inconsciemment leur avatar, comblant le vide si le système le permet.

Bien que la majorité des travaux en RV suive la logique des avatars représentés à la première personne, il existe cependant des travaux basés sur une vue à la troisième personne [GCAR17]. Dans ce cas, l'utilisateur immergé pilote un avatar virtuel présent dans l'environnement. La caméra est placée en général à quelques centimètres de l'avatar permettant à l'utilisateur de percevoir l'intégralité du corps virtuel.



FIGURE 2.13: Avatar expressifs Oculus

D'après Fabri et Moore [FM05], l'utilisation d'ERVC qui incorporent des avatars émotionnellement expressifs a le potentiel d'engendrer de l'empathie parmi les utilisateurs de tels environnements. Le visage de l'avatar, principal dispositif d'interaction, est capable d'afficher les six expressions faciales « universelles » de l'émotion : bonheur, surprise, colère, peur, tristesse et dégoût [EOF91]. On peut vérifier l'impact de cette fonctionnalité sur l'expérience utilisateur à travers quatre observables [FM05] : (1) plus d'implication dans une tâche donnée (2) plus de

plaisir de l'expérience (3) un degré de présence plus élevé pendant la tâche (4) une meilleure performance dans les tâches à accomplir. La société Oculus a conçu en 2016 des avatars destinés aux environnements de RV [Ocu19]. En 2019 a été ajoutée la fonctionnalité expressive des avatars pour simuler le mouvement des yeux, de la bouche (cf. figure 2.13). L'objectif est d'aider les utilisateurs à avoir des interactions naturelles en RV. D'après Oculus la simulation d'une expression humaine en RV, même la plus élémentaire, représente un énorme défi de conception (plusieurs dizaines de développeurs répartis dans plusieurs équipes).

2.2 La réalité augmentée et la réalité mixte

Afin d'écartier toute ambiguïté avec la RV, nous proposons dans cette section de définir les notions de réalité augmentée (RA) et réalité mixte (RM).

Le terme de réalité augmentée a été introduit au début des années 1990 [CM92] pour désigner une forme particulière d'interaction homme-machine fondée sur l'association sémantique et spatiale d'objets réels et virtuels, c'est-à-dire générés par un ordinateur [ABME07]. En d'autres termes, la réalité augmentée permet d'ajouter des informations virtuelles (textes, objets virtuels, personnages, etc.) dans le monde réel [Lou01]. D'après Fuchs [Fuc18], la réalité augmentée doit être interprétée comme une perception de l'augmentation de la réalité et non comme une augmentation de la réalité, car le monde réel reste le même (il n'est pas augmenté) et ce n'est que par l'intermédiaire de ces techniques que l'utilisateur perçoit mieux le monde réel [Fuc18]. Contrairement à la RV, la RA ne vise donc pas une substitution du monde réel par un monde virtuel.

La RA est très utilisée dans le contexte de l'apprentissage [ABME07]. Elle fournit un double support réel-virtuel à l'activité de l'apprenant, ce qui permet d'apprendre par l'action, de montrer simultanément des artefacts physiques pendant une situation d'apprentissage, de faciliter l'élaboration de représentations de relations spatiales dynamiques et leur évolution dans le temps et l'espace, de manipuler des objets familiers (ce qui conduirait à une forte sensation de présence). Elle permet aussi de stocker et délivrer des informations contextualisées en temps réel, permettant ainsi de réduire les risques d'erreurs pendant une situation d'apprentissage [NYC⁺02] et de minimiser l'utilisation du support papier. Elle permet d'accroître la motivation des apprenants par le fait de la nouveauté du mode d'interaction [ZLGB03].

La RM quant à elle définit un monde mixte créé à partir du monde réel et d'entités virtuelles [Fuc18]. Cette notion est utilisée par Milgram et Kishino dans leurs travaux sur le continuum de la virtualité pour désigner le juste milieu entre la RV et la RA [MK94] (voir figure 2.14).

Certains auteurs présentent la réalité mixte comme un système combinant à la fois RV et RA [SHN19]. Pour Microsoft, créateur du casque de réalité mixte HoloLens 2.15, la RM permet de repousser les murs de la salle de classe grâce aux possibilités d'immersion et de stimulation ; elle renforce la participation des apprenants et améliore les résultats d'apprentissage grâce aux technologies 3D ; elle favorise l'apprentissage social et affectif en brisant les barrières émotionnelles pour permettre aux étudiants d'appréhender la vie sous un nouveau jour ; elle permet de donner vie à des leçons.

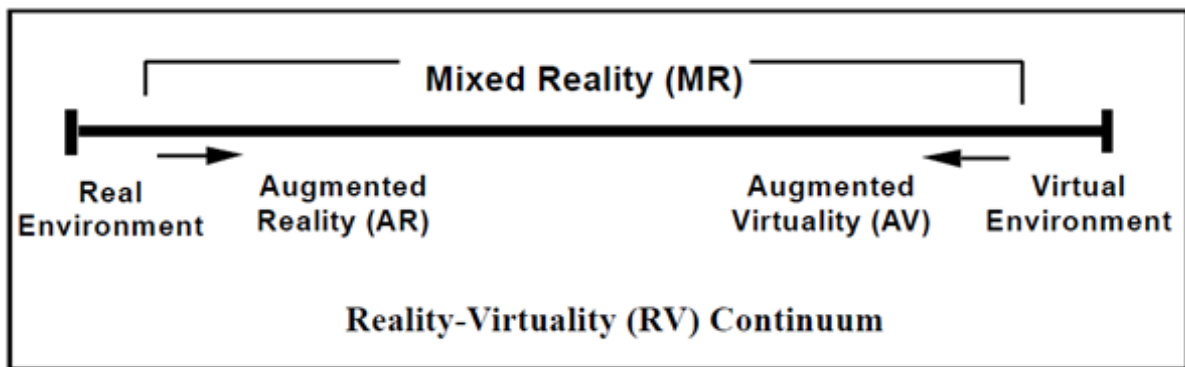


FIGURE 2.14: Le continuum de la virtualité de Milgram et Kishino [MK94]



FIGURE 2.15: Casque de réalité mixte HoloLens

Chapitre 3

LA FORMATION À DISTANCE

Dans ce chapitre nous faisons un tour d'horizon rapide du concept de Formation à Distance (FAD). La première section consiste à définir le cadre théorique de l'apprentissage en décrivant les différentes approches. La seconde section présente un bref aperçu du contexte historique et du concept de FAD. Nous terminons ce chapitre en présentant le concept de « Virtual Distance Learning » créé dans le cadre de nos travaux.

3.1 L'apprentissage : cadre théorique

Dans un sens large, l'apprentissage peut se définir comme le regroupement de différents mécanismes par lesquels un sujet humain modifie sa conduite avec l'expérience, de façon à la rendre plus adaptée aux exigences de la situation [FMA06]. L'apprentissage repose donc sur des processus de maturation biologique (en particulier chez l'enfant), sur des processus physiologiques, sur des processus cognitifs et sur des processus sociaux dans le cadre de la confrontation du sujet à l'environnement. Il existe plusieurs théories d'apprentissage qui visent à expliquer le phénomène d'acquisition des connaissances [MLJ19]. Nous pouvons à cet égard rappeler les grands courants épistémologiques que sont le behaviorisme, le cognitivisme, le constructivisme, le socioconstructivisme et le connectivisme.

3.1.1 Le behaviorisme

Cette théorie est apparue au début du XXe siècle avec les travaux du psychologue John Watson qui s'est intéressé à l'étude des comportements observables sans faire appel à des mécanismes internes au cerveau ou à des processus mentaux non directement observables [GB90]. Pavlov en est l'un des précurseurs avec le concept de conditionnement classique¹. La théorie du behaviorisme considère l'apprentissage comme un résultat durable du comportement résultant d'un entraînement particulier. Pour Fechner, l'un des défenseurs de cette théorie, l'individu est considéré comme une boîte noire, dont on ne sait rien sur ce qui se passe à l'intérieur, mais dont on peut prévoir certains comportements puisqu'en proposant des stimuli particuliers, on obtient toujours les mêmes résultats à la sortie (cf. figure 3.1) [RR18]. L'acquisition des connaissances se fait donc par paliers successifs, le passage d'un palier à l'autre s'opérant par des renforcements positifs des comportements attendus. L'enseignant est le principal acteur, il transmet l'information, la connaissance, présente, décrit, schématise,

1. L'expérience de Pavlov a été menée pour venir appuyer le concept du conditionnement classique. Par répétition, Pavlov a réussi à faire saliver un chien lorsqu'il entend le son d'une cloche. Le son de la cloche était associé à la nourriture. Ceci démontre que le comportement de réagir au son de la cloche veut dire que le chien pense recevoir la nourriture (stimulus/réponse). Ceci vient appuyer son concept du conditionnement classique, d'agir au moment du comportement. Source : <http://bulletinelectronique1.weebly.com/le-behaviorisme.html>

planifie et vérifie. L'apprenant quant à lui, écoute, regarde, réagit et tente de reproduire face à l'enseignant.

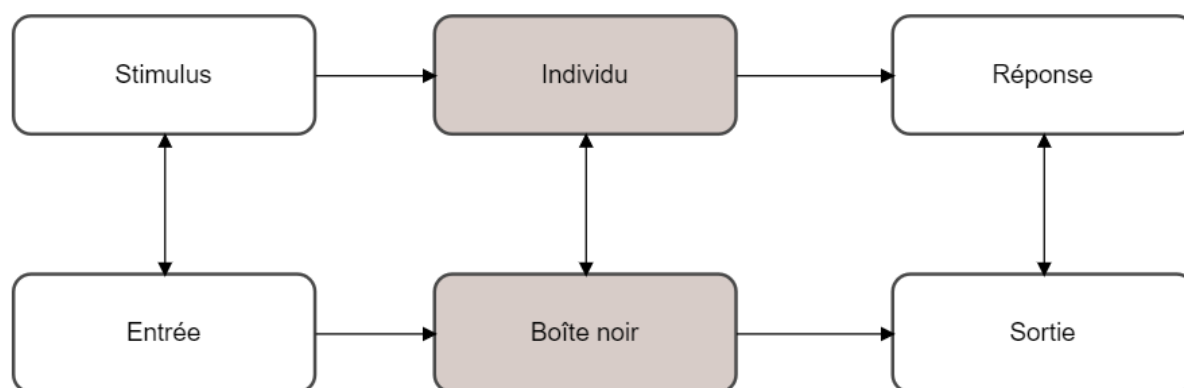


FIGURE 3.1: Modèle comportemental de Fechner [MLJI19]

3.1.2 Le cognitivisme

Cette théorie a été développée en 1956 par les chercheurs Miller et Bruner, qui considèrent que l'apprentissage ne peut être limité à un enregistrement conditionné, mais doit plutôt être envisagé comme nécessitant un traitement complexe de l'information reçue [MLJI19]. D'après cette théorie, il existe trois grandes catégories de connaissances représentées différemment dans la mémoire : les connaissances déclaratives qui répondent au « QUOI » ; les connaissances procédurales qui répondent au « COMMENT » et les connaissances conditionnelles qui répondent au « QUAND » et au « POURQUOI » [Leg92]. L'apprenant est présenté ici comme un système actif qui traite l'information (comme un ordinateur). L'enseignant est gestionnaire des apprentissages, il guide, anime, dirige conseille, explique, régule, remédie.

3.1.3 Le constructivisme

Cette théorie a été développée par Piaget en 1964 [MLJI19] et met en avant le fait que les activités et les capacités cognitives inhérentes à chaque sujet lui permettent de comprendre et d'appréhender les réalités qui l'entourent [Ker09]. D'après Kerzil, une personne face à une situation donnée est amenée à mobiliser un certain nombre de structures cognitives, nommés schèmes opératoires. À partir de là, la personne peut soit incorporer les informations perçues au sein de sa structure cognitive (assimilation), soit modifier sa structure cognitive afin d'incorporer les éléments nouveaux provenant de la situation (accommodation) (cf. figure 3.2). L'acquisition des connaissances passe donc par la réorganisation de conceptions mentales précédentes, un travail de construction et de reconstruction. D'après cette théorie, l'apprenant

construit la réalité ou l'interprète, en se basant sur sa perception d'expériences passées. Pour Doolittle [Doo99] qui soutient cette théorie, il existe huit conditions nécessaires pour réussir une pédagogie constructiviste : (1) présenter aux apprenants des situations d'apprentissage complexes similaires à celles qu'ils rencontrent dans la vie courante ; (2) favoriser l'interaction et la collaboration entre apprenants ; (3) donner le sens aux apprentissages des élèves ; (4) tout apprentissage doit partir des acquis des apprenants ; (5) les apprenants doivent bénéficier d'une évaluation formative continue ; (6) les apprenants doivent être responsables de leurs apprentissages ; (7) les enseignants sont des guides et des agents qui facilitent l'apprentissage ; (8) revoir les contenus et les présenter selon diverses perspectives. D'après Mohammed *et al.* [MLJI19], cette théorie est prometteuse du point de vue des technologies éducatives car elle favorise les outils permettant à l'apprenant de faire preuve d'autonomie et d'avancer à son rythme.

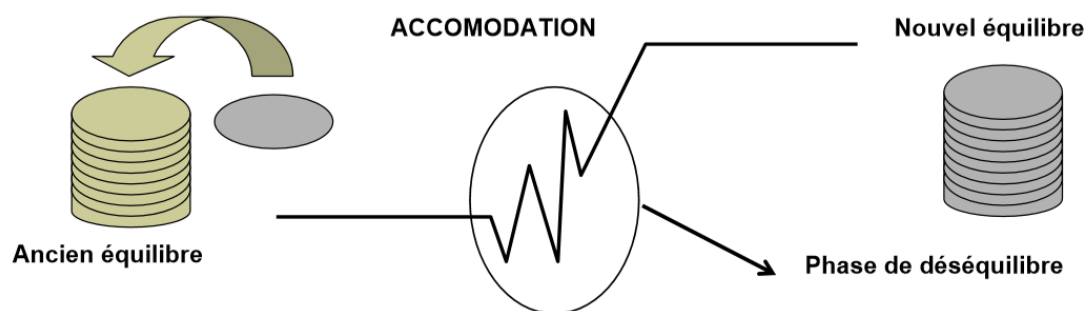


FIGURE 3.2: Assimilation/accommodation [MLJI19]

3.1.4 Le socioconstructivisme

Cette théorie a été proposée par Vygotsky [Vyg80], qui tire principalement ses sources des travaux sur l'évolution et l'adaptation de l'être humain de Piaget [BGD14] en y associant le rôle social des apprentissages [MLJI19]. Les tenants du socioconstructivisme considèrent l'apprentissage comme une « co-construction » où l'apprenant développe ses connaissances à travers les interactions entre apprenant et enseignant ou entre apprenant et apprenant [Ada06]. La transmission des connaissances n'est donc plus le seul moyen d'apprendre, l'apprentissage se fait aussi grâce aux interactions [DM81]. Bruner [Bru96] qui soutient cette théorie pense que l'enseignant doit faire en sorte que la tâche d'apprentissage soit plus agréable à réaliser avec son aide tout en évitant que l'apprenant devienne trop dépendant de lui. D'après le modèle

de Jonassen [Jon08], l'apprentissage est qualifié de socioconstructiviste lorsqu'il présente cinq caractéristiques [LM09] : 1) actif (l'apprenant a l'occasion d'expérimenter des concepts et d'observer le résultat de ses expérimentations) ; 2) constructif (il intègre de nouvelles connaissances à ses connaissances antérieures) ; 3) intentionnel (il se fixe des objectifs d'apprentissage personnels et évalue son cheminement) ; 4) authentique (il aborde un concept sous ses multiples dimensions et ses divers contextes) ; et 5) coopératif (il collabore avec les autres pour construire ses connaissances et contribuer à la construction d'un produit collectif).

3.1.5 Le connectivisme

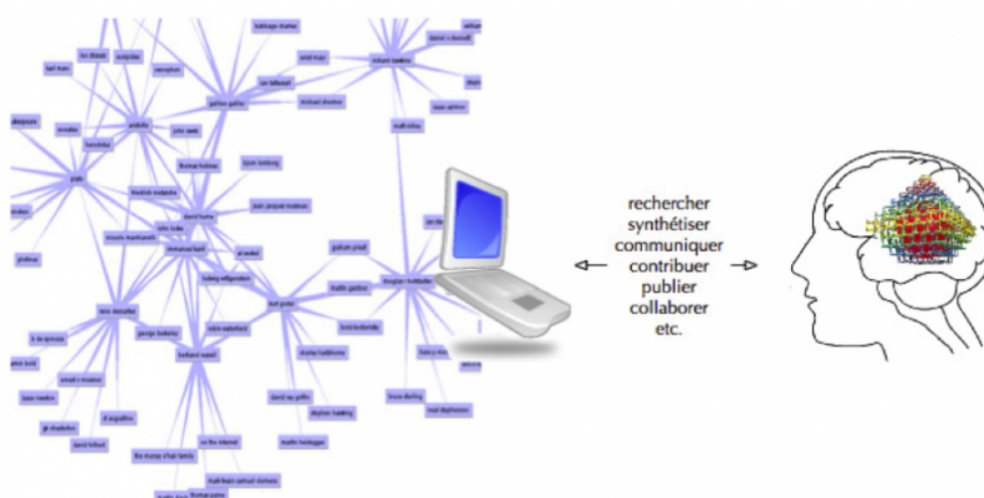


FIGURE 3.3: Le connectivisme [MLJ19]

Siemens propose comme alternative aux théories précédentes une théorie qui ne cherche pas seulement à étudier comment l'apprentissage se produit « à l'intérieur de la personne » mais aussi en dehors d'elle. Autrement dit, il cherche à construire un modèle qui rejette l'idée que l'apprentissage n'est que le seul résultat d'une activité individuelle et interne mais qu'il est « aussi fonction de l'entourage et des outils de communication dont on dispose » [Gui10]. D'après la théorie du connectivisme, l'apprentissage est représenté métaphoriquement par un réseau composé de nœuds et de connexions (voir figure 3.3). L'apprentissage est un processus qui se produit sur la base d'une variété d'éléments en constante évolution. Le point de départ du connectivisme est l'individu. La connaissance personnelle est constituée d'un réseau, qui alimente les organisations et les institutions, qui à leur tour alimentent le réseau, et continuent ensuite à fournir un apprentissage à l'individu. Ce cycle de développement des connaissances (de la personne à l'organisation en passant par le réseau) permet aux apprenants de rester à jour dans leur domaine grâce aux connexions qu'ils ont établies [Sie05]. Pour Siemens, le connectivisme est représenté par huit principes : (1) l'apprentissage et la connaissance

résident dans la diversité des opinions ; (2) L'apprentissage est un processus reliant des nœuds spécialisés ou des sources d'information ; (3) l'apprentissage peut résider dans des appareils non-humains ; (4) la capacité d'en savoir plus est plus critique que ce que l'on sait actuellement ; (5) entretenir et maintenir des connexions est nécessaire pour faciliter l'apprentissage continu ; (6) la possibilité de voir les liens entre les domaines, les idées et les concepts est une compétence de base ; (7) obtenir des connaissances précises avec la capacité de les mettre à jour est l'intention de l'apprentissage basé sur le connectivisme ; (8) la prise de décision est un processus d'apprentissage en soi. L'importance que l'on donne à une information est variable dans le temps, selon les modifications dans l'environnement de cette information.

3.1.6 Tableau récapitulatif des théories d'apprentissage

Le tableau 3.1 récapitule les cinq grands courants épistémologiques

TABLE 3.1: Synthèse des grands courants épistémologiques

Théorie	Année	Enseignant	Apprenant
Béhaviorisme	XXème siècle	Le principal acteur, il transmet l'information, la connaissance, présente, décrit, schématise, planifie et vérifie	Ecoute, regarde, réagit et tente de reproduire face à l'enseignant
Cognitivisme	1956	Gestionnaire des apprentissages, il guide, anime, dirige conseille, explique, régule, remédie	Présenté comme un système actif qui traite l'information
Constructivisme	1964	Crée des situations d'apprentissage complexe similaires à celles que retrouve l'apprenant dans sa vie courante	Essaie de comprendre son expérience et s'approprie de la connaissance
Socioconstructivisme	1980	Favorise l'interaction entre apprenants	Acquisition des connaissances grâce aux interactions sociales
Connectivisme	2005	S'appuie sur le numérique pour favoriser la collaboration et la recherche de ressources	Apprend par le biais de toutes les interactions permises par les médias sociaux

3.2 Histoire de la formation à distance

La FAD n'est pas un concept nouveau. Son histoire remonte à la moitié du XIXe siècle environ et peut être divisée en quatre générations.

Première génération : Les cours par correspondance

La première génération de la FAD est caractérisée par des cours par correspondance. Le premier cours par correspondance est créé en à Londres en 1840 [Kwi04] au moment de la généralisation du timbre-poste [Sal04]. Les supports de cours et devoirs étaient transmis aux apprenants par courrier postal. L'objectif de ces cours était de promouvoir l'acquisition de connaissances pour tous, en particulier les apprenants confrontés à des contraintes géographiques [MD96, Viv02]. Ces cours constituaient aussi une forme de « seconde chance » pour les adultes n'ayant pas réussi leur enseignement secondaire ou supérieur [Mar14]. L'assistance apportée aux apprenants par les tuteurs était basée sur la correction des devoirs. En d'autres termes, les interactions dans ce mode d'apprentissage étaient faibles et les abandons nombreux [Viv02].

Seconde génération : Diversification des médias

La seconde génération de la FAD est marquée par une diversification des médias utilisés. En



FIGURE 3.4: Supports d'apprentissage ASSIMIL des années 1930 aux années 1970-80 [Mar14]

plus de l'imprimé, les cours sont transmis aux apprenants sous forme de bandes audios et vidéos. À partir de 1920, la radio était utilisée pour diffuser des programmes éducatifs en Europe. En 1929 la société ASSIMIL proposa une méthode pédagogique basée premièrement sur du papier et ensuite diffusée par radio pour faciliter l'apprentissage des langues [Mar14]. Les leçons furent par la suite enregistrées sur des disques pour donner aux apprenants la possibilité de les écouter et réécouter à leur guise (cf. figure 3.4). Ceci permettait d'une certaine façon de s'affranchir de la contrainte temporelle. L'apprentissage fût tout d'abord influencé par la théorie du béhaviorisme [Mar14]. L'interaction était toujours limitée à la correction des travaux par correspondance et parfois au téléphone entre apprenant et tuteur [MD96]. Bien qu'on ne parlât

pas encore de l'individualisation des enseignements, on parlait déjà de l'individualisation des outils [Mar14]. En résumé, cette seconde génération est marquée par la démultiplication des supports de transmission. L'interaction reste toujours très faible entre enseignant et apprenant.

Troisième génération : Utilisation de l'informatique

La troisième période est marquée par le développement de l'informatique et de l'enseignement à distance interactif [Mar14]. Les premiers systèmes d'enseignement assisté par ordinateur commencèrent à émerger dans les années 1970. Au début des années 1990, le développement de l'intelligence artificielle donne naissance aux systèmes d'enseignement intelligemment assisté par ordinateur (E.I.A.O.) permettant d'assurer la progression pédagogique des apprenants. Le système universitaire s'appuyait sur des supports pédagogiques multimédias comme les didacticiels, les hypermédias et les tuteurs intelligents. Les services de télécommunication, tels que le téléphone, le fax et la messagerie électronique, étaient autant de supports de communication facilitant l'interaction entre l'apprenant et le tuteur [MD96].

Quatrième génération : Utilisation des médias interactifs et de l'internet

Cette génération est marquée par l'utilisation des médias interactifs et de l'internet pour faciliter les interactions et la communication. On assiste à l'intégration des systèmes multimédia en temps réel et à la « disparition » des supports physiques dédiés. Grâce aux avancées technologiques à partir des années 2000, l'évolution de l'internet permettra de concevoir des interactions entre machines, entre homme et machine, et entre utilisateurs. Dans cette période, on assiste à la création des plateformes d'enseignement à distance, comme Moodle créé en 2001. Avec le développement des télécommunications, les apprenants peuvent désormais communiquer de façon synchrone en utilisant les outils de visioconférence et de messagerie instantanée, et asynchrone en utilisant le courrier électronique et les forums [Han20].

3.3 Concept de la formation à distance

Il est difficile de trouver une définition exacte et complète de la formation à distance dans le contexte actuelle. De façon générale, lorsqu'on parle de FAD, la première notion clé qui en ressort est la distance spatiale. Ceci pourrait justifier le fait que plusieurs auteurs et entreprises se limitent à cet aspect dans leur définition. De notre point de vue, le concept de la formation à distance doit intégrer, les théories fondatrices, les modalités des FAD et les dimensions de la distance.

3.3.1 Les théories fondatrices de la formation à distance

Une étude réalisée par le Conseil Supérieur de l'Éducation du Québec en 2020 sur la définition et les modalités de la FAD [FD20] décrit quatre théories fondatrices et influentes de la formation à distance : la théorie de l'autonomie et l'indépendance, la distance transactionnelle, le connectivisme, et la communauté d'apprentissage. Le connectivisme a déjà été présenté dans la section 3.1.5, nous développons ci-dessous les trois autres concepts.

3.3.1.1 La théorie de l'autonomie et de l'indépendance

Cette théorie est développée par Wedemeyer [DIE13], qui présente la FAD comme « *diverses formules d'enseignement et d'apprentissage dans lesquelles enseignants et apprenants s'acquittent de leurs tâches et responsabilités essentielles à distance les uns des autres, en communiquant de diverses manières, dans le but de libérer les apprenants en classe de cadences ou de modèles d'enseignement qui ne leur conviennent pas ou de donner aux apprenants à distance la possibilité de poursuivre leur apprentissage dans leur propre environnement, mais surtout de développer chez tous les apprenants la capacité de continuer à apprendre en toute autonomie, le trait de maturité ultime de la personne instruite* »². Cette théorie présente l'autonomie comme une caractéristique principale de la FAD. L'autonomie en FAD est aussi développée dans les travaux de Cosnefroy [Cos12]. Pour lui, il y a une nécessité pour l'apprenant en FAD d'organiser par lui-même la découverte du cours, ce qui revient à se doter d'un équivalent du temps de cours dans une formation classique, mais ici sans interactions en temps réel avec l'enseignant. De plus, contrairement aux formations présentielles où les séquences de cours sont programmées à des moments et selon une durée intangible afin de structurer le temps d'étude et répartir la charge de travail des apprenants, les apprenants en FAD doivent eux-mêmes contrôler leur temps.

3.3.1.2 La distance transactionnelle

La distance transactionnelle a été théorisée par Moore [MM15]. Pour l'auteur, le concept de transaction emprunté à Dewey [Dew38] signifie que toute expérience formative intègre un degré de distance dans les transactions existantes entre l'apprenant et son environnement éducatif. Il définit alors la distance transactionnelle comme « *un espace psychologique et communicationnel entre l'enseignant et l'apprenant, mais aussi entre les apprenants, dans une situation éducationnelle* ». La distance transactionnelle porte sur trois notions clés : la structure, le dialogue, et l'autonomie. La structure « *renvoie à la rigidité ou à la flexibilité des objectifs éducatifs, des stratégies d'enseignement et des méthodes d'évaluation* » [MM15]. Le dialogue porte sur « *l'interaction ou les séries d'interactions ayant des qualités positives que d'autres*

2. Définition de la formation à distance traduite de l'anglais par la CSE du Québec [FD20]

n'ont pas. Il peut y avoir des interactions négatives ou neutres, mais le dialogue, par définition, améliore la compréhension des savoirs par l'étudiant ». Plus le dialogue augmente et plus la structure et la distance transactionnelle diminuent [MM15]. Enfin, le degré de tolérance de la distance varie en fonction de l'autonomie de l'apprenant.

3.3.1.3 La communauté d'apprentissage

Le concept de communauté d'apprentissage est présenté comme un cadre théorique dans les travaux de Garisson *et al.* [GA13]. Cette théorie est basée sur le principe que les meilleures expériences d'apprentissage se produisent dans une communauté formée d'apprenants et d'enseignants. L'apprentissage dépend de l'interaction entre trois fondements : la présence sociale, la présence cognitive et la présence enseignante [GA13, Swa19]. Les technologies émergentes et l'essor des communications ont rendu possibles les communautés d'apprentissage permettant aux étudiants d'interagir où et quand ils le souhaitent, et de s'engager en collaboration dans un environnement de groupe déterminé et cohérent [GAA01]. Sept principes reflètent l'approche pédagogique pour créer et maintenir une communauté d'apprentissage : planifier la création d'une communication ouverte et de la confiance, planifier la réflexion critique et le discours ; établir la communauté et la cohésion ; établir une dynamique d'apprentissage ciblée ; soutenir le respect et la responsabilité ; soutenir l'apprentissage qui passe à la résolution ; s'assurer que l'évaluation est conforme aux processus et résultats attendus.

3.3.2 Les modalités de formation à distance

Les modalités représentent les formes particulières que peut prendre la FAD, qui ces dernières années ont fait l'objet d'une grande diversification. Dans cette section, nous présentons brièvement les concepts d'E-learning, de M-learning, de formation hybride, de formation comodale, de FAD synchrone et asynchrone et les MOOCs.

3.3.2.1 E-learning : Apprentissage en ligne

L'e-learning représente l'utilisation des outils numériques dans tout type de formation [Mar11]. D'après Aparicio [AB13], la théorie de l'E-learning est basée sur trois composants (voir figure 3.5) qui organisent diverses relations sur lesquelles sont fondés les modèles de conception pédagogique d'apprentissage en ligne :

- **Les technologies d'apprentissage** sont les outils utilisés dans l'apprentissage en ligne ;
- **Les stratégies pédagogiques** sont ce que les instructeurs ou les systèmes d'apprentissage en ligne utilisent pour faciliter l'apprentissage, comme la collaboration, l'articulation, la réflexion, les jeux de rôle, l'exploration, entre autres ;

- **Les modèles ou constructions pédagogiques** sont des modèles cognitifs ou des constructions théoriques dérivés de modèles d'acquisition de connaissances ou de points de vue sur la cognition et les connaissances, qui forment la base de la théorie de l'apprentissage, i.e. le mécanisme par lequel nous lions la théorie à la pratique.

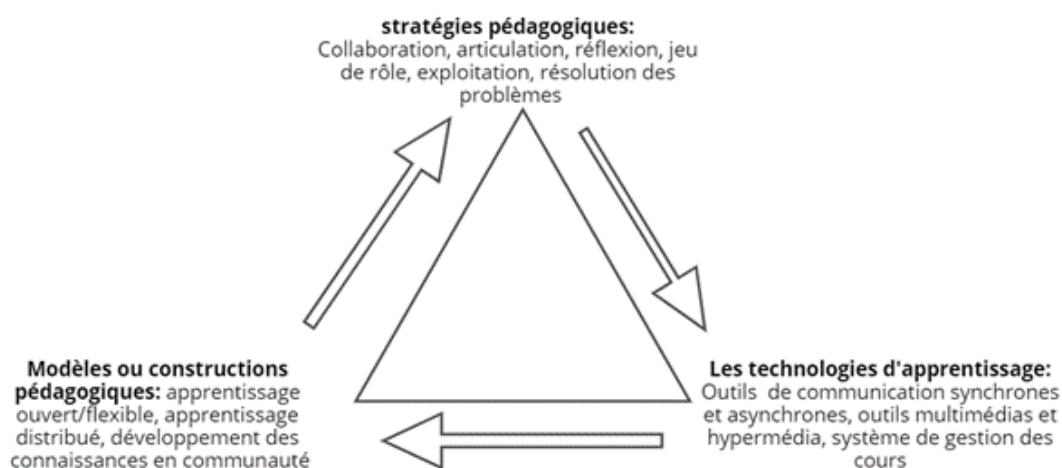


FIGURE 3.5: Théorie de l'E-learning (traduit de l'anglais depuis [AB13])

La disponibilité des technologies électroniques et web a une influence considérable sur le succès de l'apprentissage en ligne [Krä00]. Online ou Web-Based Learning [WSKS14] sont parfois utilisés pour définir l'E-learning basé sur le web. Bien que la FAD actuelle dépende fortement des ressources et des moyens de communication électroniques (i.e. des outils E-learning), ces moyens ne sont pas exclusifs à la FAD et servent aussi à enrichir les formations en présentiel. Les outils numériques utilisés dans le cadre de l'E-learning sont classés en 2 catégories, les outils synchrones et les outils asynchrones. Ces deux catégories d'outils sont présentées dans la section 3.3.2.5.

3.3.2.2 M-learning : Apprentissage mobile

Ici le terme *mobile* fait référence à l'utilisation d'appareils mobiles ou sans fil dans le but d'apprendre en se déplaçant. Cette modalité d'apprentissage utilise les téléphones portables, les smartphones, les ordinateurs de poche, les tablettes PC, les ordinateurs portables et les lecteurs multimédias personnels [oro05]. Park [Par11] se base sur la théorie de la distance transactionnelle pour définir le M-learning. Ainsi, il distingue quatre types de M-Learning :

- **Le M-learning socialisé à distance transactionnelle élevée**, où les apprenants disposent de beaucoup d'espace psychologique et communicationnel avec leur formateur ou leur soutien institutionnel. Les apprenants sont impliqués dans un apprentissage ou des projets de groupe où ils communiquent, négocient et collaborent entre eux, le

matériel d'apprentissage ou les règles d'activité sont fournis à partir du programme prédéterminé par le biais d'appareils mobiles. Les transactions se font principalement entre les apprenants, et le formateur ne participe que très peu à l'animation de l'activité groupale.

- **Le M-learning individualisé à distance transactionnelle élevée** où chaque apprenant a beaucoup d'espace psychologique et de communication individuelle avec le formateur ou le soutien pédagogique. Chaque apprenant reçoit individuellement des contenus bien structurés et bien organisés, et contrôle son processus d'apprentissage afin de le maîtriser. Les interactions se produisent principalement entre chaque apprenant et le contenu.
- **Le M-learning socialisé à distance transactionnelle faible**, où les apprenants ont moins d'espace psychologique et de communication avec le formateur. L'instruction est peu structurée, mais ils travaillent ensemble en groupe pour résoudre le problème donné et essayer d'atteindre un objectif commun ; ils s'engagent mutuellement dans une interaction sociale, une négociation et une communication fréquente.
- **Le M-learning individualisé à distance transactionnelle faible**, dans lequel il existe moins d'espace psychologique et de communication entre le formateur et l'apprenant. Le contenu d'apprentissage est peu structuré et indéfini ; chaque apprenant peut interagir individuellement avec le formateur ; l'instructeur dirige et contrôle l'apprentissage afin de répondre aux besoins individuels des apprenants tout en préservant leur indépendance.

Le M-learning peut être utilisé aussi bien dans un cours en présentiel que dans un cours à distance.

3.3.2.3 Formation hybride (Blended learning)

Les formations hybrides sont une modalité de formation assez récente qui repose sur une mise à profit des avantages de chacun des deux modes qui la composent, le présentiel et le distanciel. L'Université Laval définit la formation hybride comme étant « *un système de formation qui comprend, en proportion variable, des activités de formation offerte en présence physique des étudiants et de l'enseignant ainsi que des activités de formation à distance, synchrones ou asynchrones* » [Dev]. Dans une formation hybride, certaines situations d'apprentissage sont conçues par l'enseignant pour être réalisées à distance pendant que d'autres sont réalisés en présentiel. Une typologie de dispositifs hybrides dans laquelle chaque dispositif est identifié par cinq dimensions est proposée par le projet hyb-sub : (1) la mise à distance et les modalités d'articulation des phases présentiels et distantes ; (2) l'accompagnement humain ; (3) les formes particulières de médiatisation ; (4) les formes particulières de médiation ; (5) le degré

d'ouverture du dispositif

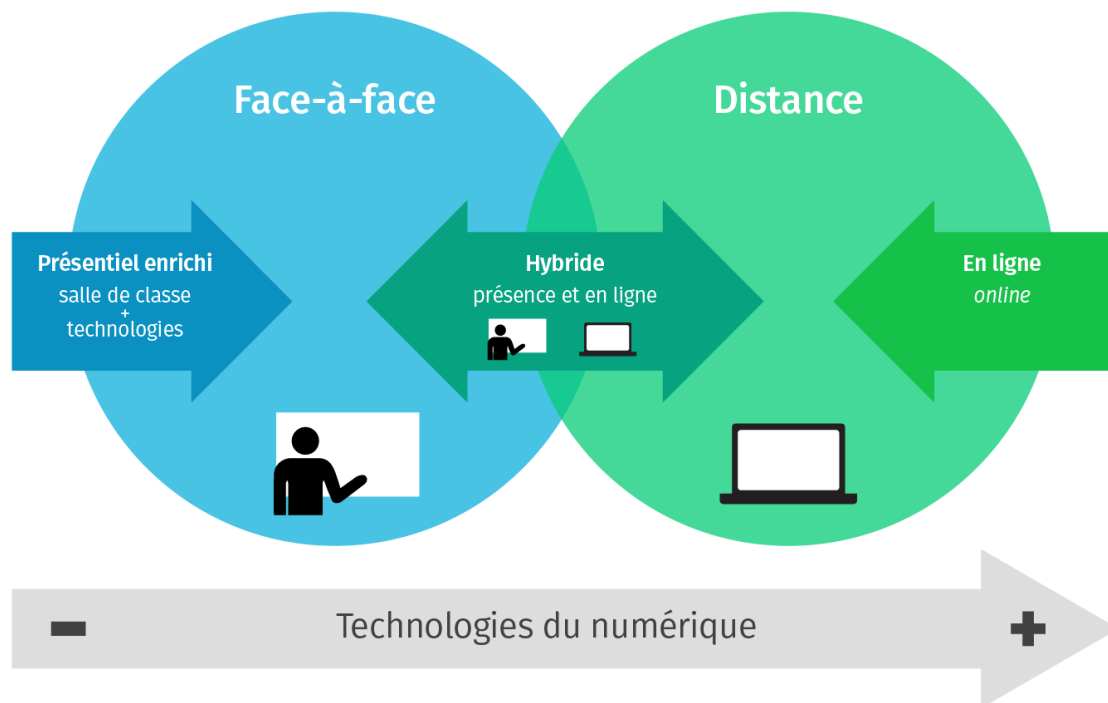


FIGURE 3.6: Formation hybride source : <https://pedagogie.ac-rennes.fr/spip.php?article4102>

3.3.2.4 Formation comodale (HyFlex)

Une formation comodale offre la possibilité aux apprenants de suivre des cours soit en présentiel soit à distance, ce qui leur permet de choisir hebdomadairement le mode qui leur convient le mieux [GP19]. Le concept a été développé en 2010 par Brian Beatty [Bea19], appelé *HyFlex* et basé sur quatre principes : (1) choix de l'apprenant (offrir des modes de participation alternatifs significatifs et permettre aux apprenants de choisir entre des modes de participation hebdomadaire) ; (2) équivalence (offrir des activités d'apprentissage équivalentes dans tous les modes de participation) ; (3) réutilisabilité (utiliser les artefacts des activités d'apprentissage dans chaque mode de participation comme ressources ou objets d'apprentissage pour tous les apprenants) ; 4) accessibilité (doter les étudiants de compétences technologiques et permettre un accès complet aux ressources pédagogiques et aux activités dans tous les modes de participation). La figure 3.7 est une représentation du système comodal.

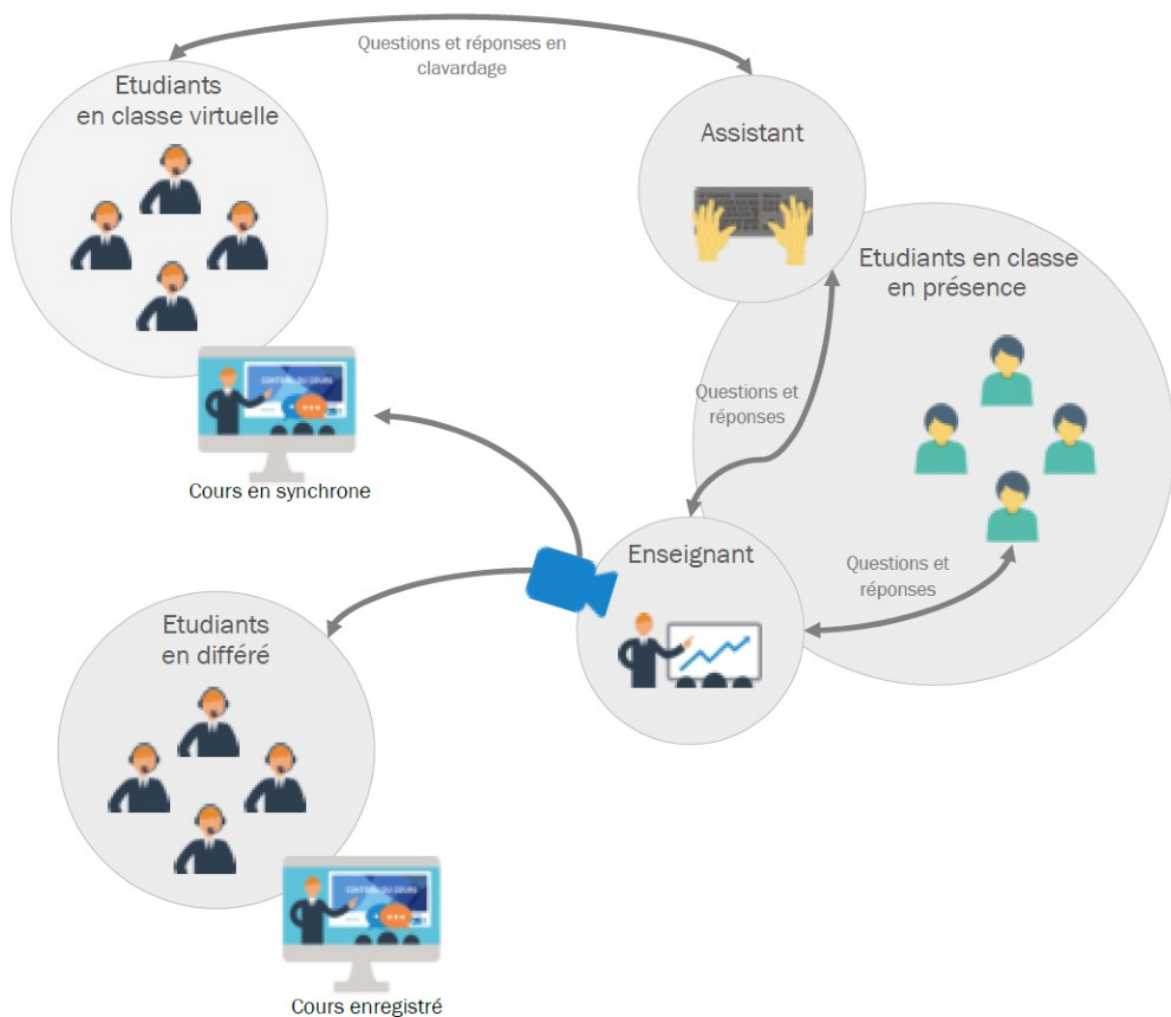


FIGURE 3.7: Représentation d'une formation comode

3.3.2.5 FAD synchrone et asynchrone

La FAD asynchrone favorise généralement les relations de travail entre les apprenants et avec les enseignants, même lorsque les participants ne peuvent pas être en ligne en même temps. Ces formations utilisent des outils asynchrones tels que le courrier électronique et les forums de discussion, les wikis, etc.

La FAD synchrone a le potentiel d'aider les apprenants en ligne dans le développement de communautés d'apprentissage. Les apprenants et les enseignants voient l'apprentissage en ligne synchrone comme plus social et évitent la frustration en posant des questions et en y répondant en temps réel. La FAD synchrone utilise généralement des outils synchrones tels que visioconférence, l'audio conférence, le chat, etc.

Il existe aujourd'hui des systèmes de gestion d'apprentissage [CAT12] (Learning Management

Systems ou LMS) qui intègrent un ensemble d'outils asynchrone et synchrone. C'est le cas de la plateforme Moodle qui est utilisée dans la majorité des universités françaises.

3.3.2.6 Les MOOC (Massive Open Online Courses)

Ces dernières années, de nouveaux modèles de formations à distance ont vu le jour. Nous pouvons par exemple citer les MOOC (Massive Open Online Courses) qui sont des formations utilisant les outils en ligne et regroupant un nombre assez important de participants (des milliers en général). D'après Cisel et Buillard [CB12], ces cours sont en général limités dans le temps (3 à 15 semaines sur Coursera) et portent sur un thème spécifique. Ils incluent un ensemble cohérent de ressources pédagogiques, de modalités d'interactions, d'exercices et d'examens conduisant éventuellement à une certification. Ils impliquent une équipe pédagogique, chargée de l'encadrement des étudiants et du bon déroulement des cours. Dans un MOOC, on retrouve toutes les ressources pédagogiques traditionnelles des cours universitaires : travaux, jeux-questionnaires, forums de discussion, plans de cours, calendriers, éléments d'évaluation, informations sur le professeur, etc. On retrouve en plus des présentations vidéo de bonne qualité, souvent un professeur qui s'adresse aux étudiants [Kar13]. Pour Devoper *et al.* [DKK17], les MOOC constituent une incarnation parfaite de la politique de l'offre en éducation, car un cours est proposé et on attend les étudiants en espérant qu'ils viendront nombreux, sans se préoccuper des besoins du public. La littérature scientifique présente 2 types de MOOC [Kar13]. Les MOOC dits connectivistes (c-MOOC) sont basés sur l'approche d'apprentissage appelée connectivisme, et nécessitent un réel engagement personnel de l'étudiant, à la fois dans l'élaboration d'objectifs d'apprentissage et la production de contenus de cours. D'autre part les MOOC dits traditionnels (x-MOOC) sont associés aux approches d'apprentissages traditionnelles de transmission des savoirs, afin d'obtenir une certification. On note d'ailleurs que certains c-MOOC de première génération se transforment parfois en x-MOOC par la suite. Trestini *et al.* [TCRP16] en donnent une explication à la fois culturelle et historique.

À l'instar des MOOC, il existe d'autres modèles de formations ouvertes à distance, par exemple les COOC (Corporate Online Open Courses) désignant l'ensemble des cours prodigués par des entreprises, le but principal étant d'accroître la visibilité de ces entreprises à l'extérieur [Acq16]. Les SPOC (Small Private Online Courses) quant à eux regroupent une petite communauté d'apprenants afin de privilégier les échanges individuels et collectifs sous forme de coaching avec le formateur, et sont privés et payants. Enfin les SOOC (Small Online Open Courses) sont eux aussi un type de MOOC qui s'adresse à un nombre réduit de participants ciblés.

3.3.3 Les diverses dimensions de la distance

La distance est l'une des caractéristiques principales des modalités propres aux FAD. D'après Jacquinot, elle peut être considérée comme le fondement de la relation pédagogique. Elle se manifeste souvent selon plusieurs dimensions [Jac93, Pui19].

La distance spatiale, souvent appelée distance géographique, se traduit dans la FAD par le fait que les apprenants n'ont pas besoin de se déplacer. Elle offre ainsi l'occasion aux apprenants situés dans des villes ou pays différents ou ayant des contraintes particulières de suivre la formation. **La distance temporelle** quant à elle se caractérise par la liberté du choix du moment et du rythme d'apprentissage [Jac93]. Les ressources des FAD sont dans la plupart des cas disponibles tout le temps en ligne via une plateforme sécurisée [Per14]. En outre, les distances spatiales et temporelles peuvent aussi générer certains problèmes. D'après Siméone [SES10], il est difficile de mettre en place la confiance en l'autre dans un dispositif de FAD, car la relation est virtuelle et les moins régulières par rapport à une formation en présentiel. De plus d'après Dussarps [Dus14], l'éloignement géographique et la virtualisation de la relation dans un dispositif de FAD sont des sources potentielles d'isolement qui peuvent conduire à une solitude mal vécue par les apprenants.

La distance technologique est liée aux facilités ou aux obstacles pour accéder aux plateformes de formation à distance et aux artefacts technologiques associés. Bien que les outils et technologies visent à faciliter l'apprentissage, il arrive quelquefois que les apprenants rencontrent des difficultés à les utiliser. Ces difficultés peuvent être liées à la modernité de la technologie, et dans ce cas elle requièrent un temps de vulgarisation, de prise en main et d'adaptation. Elles peuvent aussi être liées au fait que l'outil ou la ressource utilisée n'est pas adapté au profil des apprenants.

La distance socioculturelle offre l'occasion aux exclus du système éducatif (pour raison d'âge, d'emploi, d'échec antérieur ou de rejet de la situation classique d'enseignement) de reprendre un cursus de formation [Jac93].

La distance socioéconomique porte sur les écarts entre apprenants liés à l'investissement financier dans la formation. En effet, le coût de la formation peut dans certains cas être inaccessible pour certains, il faut compter en plus le coût du matériel, de l'abonnement Internet, des licences logicielles, etc.

La distance pédagogique enfin est celle qui surgit entre celui qui « doit ou veut apprendre et celui qui sait et veut ou doit enseigner » [Jac93]. D'après Jacquinot, cette distance est la plus difficile à apprivoiser

3.4 Les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain

La réalité virtuelle est une des technologies traitées dans le domaine des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH). Elle est généralement classée dans la catégorie des Environnements Virtuels pour l'Apprentissage Humain (EVAH). Pour les besoins de nos travaux, nous choisissons de conceptualiser la notion de EIAH dans cette partie.

L'objet des recherches sur les EIAH est d'étudier les situations pédagogiques informatisées et les logiciels qui permettent ces situations. Ce domaine implique les disciplines variées telles que le génie logiciel et l'intelligence artificielle en informatique, ainsi que la psychologie et la didactique en sciences humaines et sociales [LEJR+16]. D'après Tchounikine [Tch09a], un EIAH est un environnement informatique dont la finalité est de susciter ou accompagner l'apprentissage. Il embarque donc une intention didactique, et les EIAH ont pour objectif « *d'enseigner un domaine de connaissances à un apprenant en intégrant l'ordinateur dans une relation pédagogique enseignant/élève* » [Laf01]. Pour Tchounikine [Tch09b] l'ingénierie des EIAH renvoie aux travaux dont l'objet est d'étudier les questions scientifiques liées aux concepts, méthodes, théories, techniques et technologies utiles à la conception des EIAH et des logiciels supports à la gestion des situations pédagogiques informatisées (situation pédagogique intégrant un ou plusieurs logiciels). En outre, il définit la conception d'un EIAH comme le fait d'imaginer, de penser, d'élaborer, de représenter un artefact informatique en tenant compte des objectifs pédagogiques poursuivis et des contraintes de natures diverses pouvant s'exercer, et donc, en particulier, des situations pédagogiques visées. Pour lui, l'artefact informatique représente un EIAH spécifiquement conçu dans le but d'amener un apprenant à développer une activité favorable à l'atteinte des objectifs d'une situation pédagogique considérée. Tout ce qu'un utilisateur réalise à l'aide d'un ordinateur peut être considéré comme un artefact. Ainsi, la question centrale de l'ingénierie des EIAH est « *l'étude des relations entre, d'une part, les constructions relatives à la description des situations pédagogiques visées qui forment le contexte de la conception (théories, modèles, préceptes, discours) et, d'autre part, les modèles et les logiciels élaborés ou, à un niveau méthodologique, les démarches de conception.* » [Tch09b].

En informatique, la recherche sur l'ingénierie des EIAH se concentre principalement sur des travaux associés à la conception d'artefacts informatiques prenant en compte les objectifs et contraintes liés à un apprentissage [Tch09b]. Ainsi, les enjeux liés à l'ingénierie informatique des EIAH consistent à définir et modéliser l'intention didactique et son articulation avec les spécifications de l'artefact d'une part, et à prendre en compte un modèle des connaissances du domaine (ce qui peut amener à dissocier connaissances du domaine, de l'enseignant, de l'appre-

nant), un modèle des actions possibles de l'apprenant et des rétroactions de l'environnement, ou encore un modèle de communication médiatisée (entre apprenant et système, apprenant et tuteur ou entre apprenants), modèles qu'il faudra articuler d'autre part.

3.5 Les ERV pour la formation à distance : VD-Learning

Dans la section 3.5, nous avons présenté l'E-learning comme étant l'utilisation des outils numériques dans tout type de formation [Mar11]. Ce terme nous semble à la fois très généraliste et moins précis pour définir l'éducation ou la formation mettant des apprenants en situation d'apprentissages à distance dans un ERV, ceci pour plusieurs raisons.

Premièrement, la RV introduit des notions et pratiques « nouvelles » qui ne sont pas (ou sont peu) traitées dans le contexte de l'E-learning. Nous pensons notamment à la notion d'interfaces comportementales décrite par Fuchs [Fuc18] (interfaces sensorielles, motrices et sensorimotrices) qui diffère de la notion d'IHM généralement utilisée dans le contexte des formations en ligne. Nous pouvons également citer à titre d'exemple les notions d'immersion et d'interaction très utilisées dans la RV.

Ensuite, dans un environnement RV, l'utilisateur est placé au centre du dispositif (vision anthropocentrée).

Enfin les méthodes de conception utilisées dans le contexte des RV diffèrent de celles utilisées en général dans l'E-learning. Nous traitons ce sujet dans le chapitre 5 de ce document. À l'exemple du Mobile Learning (M-Learning) décrivant les technologies d'apprentissage mobiles utilisées à des fins éducatives et de leurs effets sur les méthodes d'enseignement et d'apprentissage, nous proposons dans nos travaux le terme « Virtual distance Learning » (VD-Learning) pour définir les formations à distance mettant des utilisateurs en situation d'apprentissage dans des environnements de réalité virtuelle. Une traduction dans la langue française que nous proposons pour ce terme est « formation à distance en environnement virtuel ». Un VD-Learning est donc basé sur quatre principes fondamentaux :

- L'apprentissage est réalisé dans un environnement virtuel. En d'autres termes, l'apprenant est immergé dans un monde virtuel tridimensionnel dans lequel il réalise des activités qui contribuent à son apprentissage
- L'environnement virtuel est basé sur une approche anthropocentrée (et non technocentrée).
- La conception du système prend en compte les exigences et les besoins des utilisateurs

finaux. Ceci peut se traduire par une approche intégrant les utilisateurs finaux dans le processus de conception.

- Les composantes de la distance sont prises en compte dans le processus de conception.

Chapitre 4

LA REALITE VIRTUELLE ET L'APPRENTISSAGE HUMAIN

La RV est de plus en plus utilisée pour l'apprentissage humain. Le terme Environnement Virtuel Éducatif (EVE) est souvent utilisé dans la recherche pour désigner les Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Enseignement (TICE) qui mobilisent la RV [LEJR⁺16]. Un EVE représente un EV basé sur un modèle pédagogique particulier, choisi en fonction d'objectifs didactiques, qui fournit aux apprenants des expériences qu'ils ne peuvent pas trouver (totalement ou partiellement) dans le monde réel, et qui favorise des apprentissages chez les apprenants [MN11]. Les EVE font partie du champ des EIAH [Tch09a].

Pour définir la RV dans un contexte d'apprentissage, Chan *et al.* [CZJ16] présentent cette technologie comme « *un moyen pour les formateurs et les apprenants de créer un monde tridimensionnel simulé, un environnement d'apprentissage vivant et réaliste pour les apprenants en termes de vision, d'audition et de toucher, en faisant en sorte que les apprenants se sentent comme des participants à l'environnement virtuel* ».

Un **apprenant** désigne « *toute personne engagée dans un processus d'apprentissage, quels que soient son âge, son sexe, son origine sociale ou culturelle, son capital d'expérience ou son niveau de connaissance, qui peut être acteur de son propre apprentissage* » [Gat09]. Dans le cadre de nos travaux, nous utilisons le terme « apprenant » pour désigner l'élève, l'étudiant, le stagiaire ou le formé en fonction du contexte.

Le **formateur** désigne une personne chargée de l'accompagnement des apprenants à différents moments dans leur processus d'apprentissage. Dans nos travaux, nous utilisons ce terme pour désigner le tuteur, l'enseignant ou l'instituteur en fonction du contexte.

Une **situation d'apprentissage** désigne une situation pédagogique conçue pour susciter ou accompagner un apprentissage cible chez un apprenant [Tch09a].

L'objectif de ce chapitre est de définir la problématique de notre recherche. Ainsi, nous réalisons premièrement un état de l'art de la littérature scientifique afin de mieux connaître les impacts de la RV sur l'apprentissage humain en général et sur la FAD en particulier. Cet état de l'art nous conduit ensuite à préciser nos questions de recherche en vue d'aménager notre problématique.

4.1 État de l'art

Il y a une quinzaine d'années, les potentialités de la RV pour l'apprentissage se situaient plus au stade de l'hypothèse que du principe démontré par la recherche [FMB06]. Aujourd'hui,

plusieurs travaux de recherche ont permis de mettre en lumière l'apport de cette technologie dans l'amélioration de l'apprentissage. Grâce à ses possibilités, la RV est présentée dans la littérature comme un outil permettant d'améliorer l'expérience des utilisateurs et d'innover dans les pratiques pédagogiques. Kaminska *et al.* [KSW⁺19] définissent cette technologie comme un outil puissant pour soutenir et faciliter les processus d'apprentissage et d'enseignement.

4.1.1 Réalité virtuelle et apprentissage humain

Les apports de la RV pour l'apprentissage humain sont traités dans différents travaux de recherche. D'après Lourdeaux [Lou01], l'utilisation de la RV pour l'apprentissage humain présente plusieurs avantages par rapport aux formations réalisées dans un environnement réel. Elle permet de :

- réaliser des tâches en toute sécurité ;
- faire des erreurs sans compromettre la sécurité des apprenants, car les erreurs sont formatrices ;
- paramétrer l'environnement de formation pour répondre à des conditions spécifiques ;
- créer des terrains d'entraînement accessibles ;
- réaliser des scénarios d'apprentissage impossibles à mettre en place dans le monde réel ;
- simuler des scénarios et des conditions rares comme des accidents techniques, afin de mettre par exemple le stagiaire en situation de stress, embarrassante, imprévue et inattendue ;
- réutiliser les équipements pour d'autres formations, être indépendant du temps.

Fuchs [Fuc18], allant dans le même sens que Lourdeaux, regroupe les apports de la RV en deux grandes catégories : les avantages de simuler un environnement virtuel mieux adapté qu'un environnement réel (simulation des terrains inaccessibles, des tâches dangereuses, des événements difficiles à reproduire en environnement réel, des tâches sur un matériel onéreux, etc.) et les avantages des fonctionnalités proposées à l'apprenant (contrôle de complexité d'une situation, décomposition des apprentissages pour mieux les appréhender, modification de la topologie spatiale d'un espace complexe, modification de la structure temporelle des tâches, visualisation des phénomènes invisible à l'œil nu, visualisation des informations indisponible dans le monde réel et rectification des concepts). De plus, pour l'auteur, plusieurs types de relations entre le formateur et l'apprenant peuvent être envisagés dans un ERV :

- Le « **tutorat** » qui permet de mettre en relation un apprenant et un formateur dans un EV. Dans ce premier type, le formateur prend en charge l'assistance de l'apprenant.
- Les situations « **d'activité en groupe supervisée** » mettant en situation un apprenant en interaction avec un groupe d'apprenants dans l'ERV. A titre d'exemple, nous avons

des ERVC où les apprenants et enseignants sont représentés dans l'ERV par des avatars (cf. chapitre 6).

- Les « **supports de cours** » représentent une ressource utilisée par le formateur devant un groupe d'apprenants. Dans ce cas, l'ERV est en soutien de la formation, permettant au formateur de réaliser des démonstrations et des explications.
- La « **situation où l'apprenant interagit seul** » dans l'EV qui permet à l'apprenant de s'autoformer via l'ERV.

D'autres auteurs présentent les apports de la RV dans le contexte d'apprentissage. Pour Kaminska *et al.* [KSW⁺19], la RV aide les étudiants à acquérir des connaissances théoriques, par exemple la terminologie, les dates, les faits, les règles ou les théories; elle permet d'enseigner des compétences pratiques en fonction des connaissances préalablement acquises et d'utiliser des compétences acquises face à des problèmes. Les travaux de Minocha [Min15] montrent que la RV peut être utilisé pour : intégrer les apprenants avec différents styles et capacités d'apprentissage, l'apprentissage interactif, rendre l'apprentissage amusant et facile, apprendre par la pratique (une approche différente des récompenses et des punitions), assister à des conférences virtuelles, des discussions, des examens ou des laboratoires en 3D, les visualisations microscopiques et macroscopiques, etc.

La RV est aussi utilisée pour des formations dans des domaines spécifiques. A titre d'exemple, dans le domaine de la médecine, elle est utilisée pour des formations aux compétences non techniques [BBC⁺17]; elle est aussi utilisée comme une méthode complémentaire et joue un rôle important dans l'amélioration des performances des différents groupes médicaux; elle permet aux apprenants de pratiquer des opérations et diverses procédures chirurgicales sur des patients virtuels [NWM04] et permet de vivre une expérience réaliste et interactive [PCP⁺18]; elle offre une formation clinique rentable, reproductible et standardisée à la demande [Pot19]; elle permet aux futurs cliniciens de comprendre les principes physiologiques importants ou d'anatomie de base grâce à la visualisation 3D de volumes massifs d'informations et bases de données [APB⁺00]; elle a été aussi utilisée pour enseigner l'habileté à effectuer différentes tâches comme un électrocardiogramme.

Pour terminer cette partie, nous explorons aussi quelques travaux sur l'expérience utilisateur des apprenants. Ainsi, l'immersion, l'interaction et l'imagination en RV influencent la motivation des apprenants avec une contribution plus forte de l'immersion que les deux autres facteurs [HRL10]. L'interaction 3D en RV a une influence positive sur la mémorisation lexicale à court terme [SVRC13]. La RV contribue au sentiment de satisfaction [OPT17, YTGC13] et permet aux apprenants de vivre une expérience de flow [BKT⁺15]. La RV permet d'apprendre plus rapidement que les tutoriels vidéo, en engageant activement les apprenants dans le processus d'apprentissage [MFH⁺17]. Une étude menée par Krokos et Varshney [KPV19] suggère que

les apprenants conservent plus d'informations et peuvent mieux appliquer ce qu'ils ont appris après avoir participé à des exercices dans un ERV.

En résumé, ces études nous permettent de constater que la RV a un impact significatif sur l'apprentissage. Les facteurs d'immersion, d'interaction, d'imagination et de présence contribuent à améliorer l'expérience utilisateur des apprenants dans un processus d'apprentissage.

4.1.2 Réalité virtuelle et formation à distance

L'utilisation de la RV dans le domaine de la FAD est plus récente, les premiers travaux datant de moins d'une décennie. Ces travaux portent principalement sur des ERVC et peuvent être regroupés en trois catégories : les travaux traitant des différents apports de la RV dans le domaine de la FAD, ceux présentant des ERVC spécifiques pour la FAD, et enfin ceux évoquant problématiques et recommandations autour de la conception des ERVC pour la FAD.

Dans la première catégorie, les apports de la RV dans les dispositifs de FAD sont présentés par différents chercheurs. D'après Harfouche [HN20], cette technologie est un moyen efficace de combler le fossé entre les formateurs et les apprenants dans un contexte de FAD. Elle transforme la façon d'enseigner et d'apprendre, car elle donne vie à des sujets complexes en créant des environnements 3D. Contrairement aux environnements 2D, les ERV ajoutent une dimension spatiale dans laquelle les apprenants et formateurs sont représentés visuellement sous forme d'avatars [Pet10] tout en promouvant la notion d'apprentissage collaboratif où ils apprennent ensemble et souvent les uns des autres [MMB08, Zik]. Fuchs [Fuc18] est aussi de cet avis lorsqu'il déclare que les ERV favorisent l'entraide entre apprenants. Pour McArdle *et al.* [MMBM04], la RV offre une nouvelle façon d'apprendre, de collaborer et de se socialiser dans un dispositif de FAD. L'immersion en RV permet d'améliorer l'expérience d'apprentissage à distance, et l'interaction produit chez les apprenants un sentiment de présence comme s'ils étaient dans une salle réelle [AETAA12]. Ces environnements semblables aux environnements réels permettent aux apprenants d'être pleinement impliqués dans leur processus d'apprentissage au lieu d'être des observateurs [TMK10]. La RV améliore les compétences de visualisation spatiale 3D des apprenants, à la fois pour les cours en ligne et en face à face, et favorise un apprentissage profond et cohérent (la liberté d'interaction par le mouvement du corps et par la prise de parole motive l'utilisateur) [Mic19]. Dans un ERVC destiné à la FAD, la personnalisation des avatars a un impact sur la motivation de l'apprenant ; la communication engageante dans la FAD stimule la motivation de l'apprenant [Bou09]. D'après Dimitropoulos *et al.* [DMM08], les plateformes RV jouent un rôle éducatif multilatéral en fournissant non seulement une plateforme pour la présentation de matériel pédagogique, mais également un moyen de communication

entre les membres d'une communauté d'apprentissage.

Dans la seconde catégorie, nous pouvons citer plusieurs travaux de recherche présentant des ERVC pour la FAD. De manière générale, ces ERVC tentent de reproduire les conditions d'une situation d'apprentissage en présentiel (salle de cours, laboratoire virtuel, spatialisation du son, environnements réalistes, etc). L'environnement WMUVC [qChZxJ16] est par exemple une sorte de campus virtuel représentant une université. Les cours sont réalisés dans une « vraie » salle de classe virtuelle. Pendant un cours, un apprenant peut communiquer et discuter avec le formateur et les autres apprenants comme dans un cours en présentiel. Les apprenants peuvent observer les détails et les étapes de l'expérience menée par le formateur. Les apprenants peuvent se faire des amis sur le campus, l'enseignant peut faire des conférences, revoir les travaux des élèves, effectuer des examens ; les managers peuvent gérer les activités pédagogiques quotidiennes et les affaires des étudiants. VirtualMed est un autre ERVC qui intègre une classe virtuelle permettant de simuler une classe « réelle » pour permettre aux apprenants de participer à un processus d'apprentissage interactif avec un accès aux ressources en direct. Le système intègre aussi un laboratoire virtuel permettant aux apprenants de participer aux conférences virtuelles et de connecter l'environnement d'apprentissage physique à la simulation de l'application. il dispose aussi d'une librairie connectée à des ressources externes ainsi que des simulations autour de pathologies spécifiques et de la structure cellulaire humaine. Nous pouvons aussi citer CLEV-R (Collaborative Learning Environment with Virtual Reality) [MMBM04] qui est un ERVC basé sur le web et destiné à l'apprentissage en ligne. Le système intègre : (1) une interface graphique permettant aux utilisateurs de s'inscrire et de se connecter, gérer la communication (gestuelle, textuelle et vocale) entre apprenants, l'enregistrement des communications, l'administration des groupes, etc ; (2) la gestion des salles virtuelles (la salle de conférences, les salles de groupe, les couloirs, espaces privés) ; (3) des optimisations permettant de traiter les problèmes de réseau et l'affichage des éléments graphiques dans un laps de temps raisonnable. Le système est basé sur une architecture client-serveur, où le serveur est responsable de la connexion à l'environnement et synchronise les changements pour tous les utilisateurs. Un autre exemple est le NTU (Nanyang Technological University) Virtual Campus [Sou04], qui représente un campus virtuel dans lequel les apprenants peuvent prendre la forme d'un avatar humain ou de tout autre objet (certains utilisateurs choisissent de ressembler à des personnes imaginaires, d'autres se transforment en voitures de sport, en nuages étincelants ou en boules de feu, etc). Dans l'espace virtuel, les apprenants peuvent s'amuser, se faire des amis, apprendre des concepts de la RV et de la modélisation. Ils peuvent aussi naviguer dans différents lieux (hôpital, hôtels, amphithéâtre, résidence universitaire, bibliothèque, etc) pour discuter avec les autres utilisateurs. Contrairement aux ERVC qui cherchent à se rapprocher du réel, NTU Virtual Campus offre la possibilité aux utilisateurs de réaliser des actions imaginaires comme se déplacer en volant.

Enfin la troisième catégorie regroupe les travaux présentant les problématiques techniques liées à la conception des ERVC d'une part, et ceux proposant des recommandations pour la conception de ces environnements d'autre part. Ainsi sur le plan technique, Abidi *et al.* [AETAA12] présentent des problématiques liées à la création d'un ERVC. Il s'agit : (1) du choix de l'architecture de la communication utilisateur et les protocoles d'interfaçage; (2) de la manière dont les données sont stockées et organisées (architecture des données); (3) de la minimisation du trafic réseau et de la compensation de la latence; (4) du maintien d'un état d'environnement cohérent pour tous les utilisateurs; (5) de l'analyse des interactions entre objets dans l'environnement virtuel, comme la détection de collisions. Les travaux de He [HWGLA18] mettent l'accent sur le fait que les réseaux actuels ont encore du mal à diffuser des contenus de haute qualité. D'un point de vue fonctionnel, Dimitropoulos *et al.* [DMM08] formulent plusieurs recommandations pour la spécification d'un ERV dans un contexte de FAD. Premièrement, il faut prendre en compte les exigences des hypermédias (interfaces IHM) c'est à dire la vitesse de chargement de la page, la facilité de navigation, un moteur de recherche local si le site a plusieurs pages, une charte graphique cohérente etc. Ensuite il faut prendre en compte les exigences de la RV c'est à dire l'immersion, l'interaction, la présence, le déplacement dans l'ERV etc. Enfin, les exigences liées à l'apprentissage et en particulier à la formation à distance c'est à dire l'autonomie, participation active des apprenants au processus d'apprentissage, caractère exploratoire des activités proposées, capacité à retenir l'attention des apprenants et promotion d'une étude approfondie des contenus, matériel aussi diachronique que possible, l'application doit se concentrer sur les problèmes liés aux troubles d'apprentissage, l'application doit permettre le développement des compétences spécifiques, le traitement, la modélisation et la simulation sont des caractéristiques majeures d'un système éducatif, l'application doit combiner des objectifs instructifs de différentes disciplines, le système doit favoriser la communication entre apprenants, l'application doit être extensible et réutilisable.

4.2 Problématiques et hypothèses de recherche

Il ressort de l'état de l'art réalisé dans la section précédente que la RV a un impact positif sur l'apprentissage. D'après Taoum *et al.* [TNBQ16], la RV est l'une des technologies qui a le plus de potentiel pour changer et améliorer la formation. Elle est décrite par Rogers [Rog19] comme l'aide à l'apprentissage du 21^e siècle.

Dans le contexte de la FAD en particulier, malgré l'arrivée récente de cette technologie les premiers travaux semblent prometteurs. Les chercheurs exploitent l'immersion, l'interaction et la présence virtuelle de la RV pour reproduire dans un contexte de FAD (dans la mesure

du possible) les situations d'apprentissage semblables à celles réalisées dans le monde réel en impliquant les apprenants dans le processus d'apprentissage et en favorisant les interactions entre apprenants.

Cependant, si nous considérons la RV comme un EIAH, évaluer son impact sur la FAD revient à l'évaluer sur trois dimensions : l'utilité, l'utilisabilité et l'acceptabilité [TPSC⁺03, NJDOB04, Ren20]. L'utilité représente l'adéquation entre les fonctionnalités proposées par le système et celles nécessaires aux utilisateurs pour atteindre les objectifs cibles [Sen90]. En d'autres termes, l'évaluation de l'utilité consiste à évaluer d'une part l'apprentissage (de la discipline enseignée et non pas de la manipulation du système), et d'autre part l'exécution des tâches suggérées par le système dans le but de permettre cet apprentissage (résolution d'un problème, interaction avec les autres apprenants, etc). Évaluer l'utilité d'un EIAH ne se limite donc pas à vérifier si l'apprenant peut réaliser les tâches dans l'environnement, mais il s'agit aussi de vérifier que la tâche réalisée permet de répondre à un objectif défini [NJDGD06]. L'utilisabilité représente le degré selon lequel l'EIAH peut être utilisé par des utilisateurs spécifiés, pour atteindre des buts définis avec efficacité, efficience et satisfaction, dans un contexte d'utilisation spécifié [fS19]. D'après Tricot [TPSC⁺03], « *l'utilisabilité se joue au niveau de l'interface (sa cohérence, sa lisibilité, la façon dont elle présente les actions possibles, etc.), de la navigation (la cohérence, la simplicité, l'exhaustivité des déplacements possible) et de sa cohérence avec l'objectif. [...]* » L'acceptabilité est la valeur de la représentation mentale (aptitude, opinions, etc. plus ou moins positives) à propos d'un EIAH, de son utilité et de son utilisabilité. D'après Nogry [NJDGD06], cette représentation mentale est individuelle ou collective et peut conditionner la décision d'utilisation d'un EIAH. De plus, certains facteurs peuvent conditionner l'acceptabilité d'un système. Il s'agit de la culture et des valeurs de l'utilisateur, ses affects, ses motivations, l'organisation sociale et les pratiques dans lesquelles s'insère plus ou moins bien l'EIAH [TPSC⁺03]. De notre point de vue, le terme acceptabilité devrait être généralisé pour exprimer l'expérience globale ressentie par l'utilisateur. Nous utiliserons donc le terme expérience utilisateur à la place d'acceptabilité.

En considérant l'état de l'art de la RV sur la FAD, nous pouvons déduire que cette technologie semble utile pour la FAD notamment pour des situations d'apprentissages collaboratifs impliquant les apprenants dans le processus d'apprentissage et favorisant l'interaction apprenant-apprenant et apprenant-enseignant. En outre, de notre point de vue, il existe aujourd'hui très peu de données issues de la recherche pour généraliser l'utilisabilité de la RV dans un contexte de FAD. Pour conforter cette affirmation, un sondage réalisé dans le cadre de nos travaux (cf. Section 6.1) auprès d'un public de 230 personnes familières à la FAD a indiqué que seulement 40,9% avaient déjà utilisé un visiocasque au moins une fois et 33,5% avaient déjà entendu

parler de la RV sans jamais utiliser un visiocasque (cf. figure 4.1). Ainsi, nous pouvons conclure que la façon de percevoir, de comprendre, d'utiliser la RV par les utilisateurs finaux (apprenants et enseignants) et le comportement de ces utilisateurs dans des ERV (apprentissage, adaptation et appropriation de l'outil) sont difficilement anticipables. Pour ce qui est de l'expérience utilisateur, l'utilisation de la RV dans la FAD est souvent considérée comme une solution technique à la distance et tend généralement à oublier les besoins d'apprentissage des étudiants et leur satisfaction à l'égard de l'expérience d'apprentissage [AETAA12]. Par ailleurs, nous avons vu dans la section 3.3.3 que cette distance était l'une des caractéristiques principales propres aux modalités de FAD, et pouvait se manifester chez l'apprenant sur plusieurs dimensions (cf. section 3.3.3). En effet d'après Siméone [SES10], il est difficile de mettre en place la confiance en l'autre dans un dispositif de FAD car la relation est virtuelle et les interactions sont moins régulières par rapport à une formation en présentiel. De plus, d'après Dussarps [Dus14], l'éloignement géographique et la virtualisation de la relation dans un dispositif de FAD sont des sources potentielles d'isolement qui peuvent conduire à la solitude lorsque cet isolement est mal vécu par les apprenants. Toutes ces questions sont peu ou pas traitées dans les travaux existants.

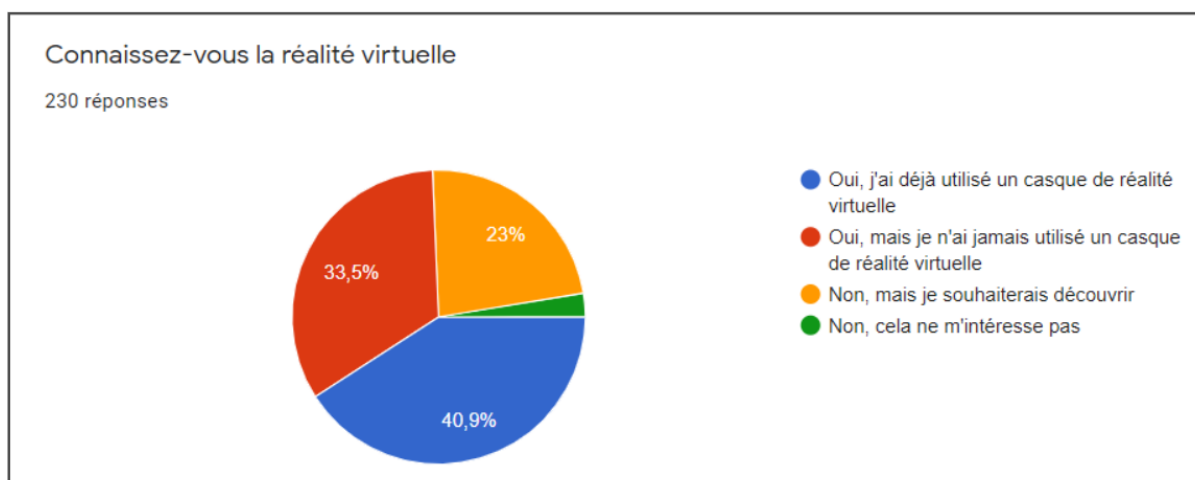


FIGURE 4.1: Sondage sur l'utilisation de la RV

Enfin l'ingénierie des ERV pour la FAD doit faire face aux défis techniques liés à la fois à la RV, au confort et à la santé des utilisateurs, aux tâches d'apprentissage et à la formation à distance (nous présentons en détail chacun de ces défis dans la section 5.2). Cependant, les méthodologies de conception existantes ne les prennent pas en compte, notamment ceux spécifiques à la formation à distance).

Ainsi, la question principale de nos travaux consiste à étudier comment la RV peut impacter la FAD en termes d'utilité, d'utilisabilité et d'expérience utilisateur. Nous traitons d'une part

la problématique de la conception et de la réalisation des ERV spécifiques à la formation à distance. D'autre part, nous étudions comment le sentiment de coprésence et le rapprochement des apprenants peuvent être améliorés dans un ERVC. Notre questionnement de recherche porte plus précisément sur l'impact du choix des avatars sur le sentiment de coprésence des apprenants, et nous formulons les hypothèses suivantes :

- **Hypothèse 1** : Dans un contexte de FAD, un ERVC contribue à l'implication des apprenants dans la réalisation des activités groupales.
- **Hypothèse 2** : Dans un contexte de FAD, un ERVC permet de rapprocher virtuellement les apprenants.
- **Hypothèse 3** : Dans un contexte de FAD, un ERVC contribue à la communication chaleureuse (avec sympathie, cordialité, enthousiasme) entre apprenants.
- **Hypothèse 4** : Dans un contexte de FAD, un ERVC contribue à la motivation des apprenants à réaliser des activités groupales avec d'autres apprenants.
- **Hypothèse 5** : Dans un contexte de FAD en ERVC, l'interaction avec les autres *via* la communication vocale suscite beaucoup d'intérêt chez les apprenants.
- **Hypothèse 6** : Dans un contexte de FAD en ERVC, les apprenants sont disposés à partager leurs informations personnelles avec d'autres apprenants.

Pour chacun de ces items, nous faisons l'hypothèse qu'un haut degré d'anthropomorphisme pour représenter les avatars des apprenants a un impact significatif.

Chapitre 5

LA CONCEPTION DES VD-LEARNING

L'objectif de ce chapitre consiste à formaliser une méthodologie de conception des ERV pour la formation à distance. Dans un premier temps, nous décrivons le modèle général de conception des ERV. Dans un second temps, nous décrivons les défis liés à la conception des ERV pour la formation à distance. Ensuite, nous présentons les différentes approches de conception des ERV existantes ainsi que des approches spécifiques à l'apprentissage. Puis, nous formalisons une approche de conception spécifique des VD-Learning définis dans la section 3.5. Enfin, pour terminer le chapitre nous listons quelques outils de création des VD-Learning.

5.1 Modèle de référence pour la conception d'un environnement de RV

Dans cette première partie, nous décrivons les trois niveaux d'immersion et d'interaction ainsi que les Aides Logicielles Comportementales (ALC).

5.1.1 Les 3 niveaux d'immersion et d'interaction

Dans la section 2.1.2, nous avons présenté la vision anthropocentrée de la RV ainsi qu'une représentation anthropocentrée du schéma de la perception du monde virtuel par l'humain (cf. figure 2.8). Dans cette vision, l'utilisateur immergé dans l'ERV est au centre du système, car l'application RV est conçue pour lui. Bien que le concepteur d'un ERV doive se référer à ce schéma anthropocentré, il est aussi nécessaire d'analyser le processus d'interfaçage et les dispositifs à concevoir [Fuc16]. La littérature scientifique française [Lou01, Fuc16, Fuc18] propose donc un modèle de référence de la RV à trois niveaux d'immersion et d'interaction : l'immersion et l'interaction sensorimotrice (les I^2 sensorimotrices) ; l'immersion et l'interaction cognitives (les I^2 cognitives) ; l'immersion et l'interaction fonctionnelles (les I^2 fonctionnelles). En plus de l'immersion, le terme interaction est intégré à chaque niveau afin de mettre en évidence l'innovation de la RV, qui est de permettre à l'utilisateur immergé de réaliser des actions dans un monde virtuel. Ces différents niveaux sont matérialisés sur la figure 5.1.

5.1.1.1 Les I^2 sensorimotrices

Les I^2 sensorimotrices correspondent à la description physique de l'utilisateur [Fuc16]). Elles sont représentées par le modèle physique de l'EV et décrivent la correspondance entre les caractéristiques métrologiques des interfaces utilisées et les caractéristiques psychophysiques des sens et des réponses motrices de l'utilisateur. En d'autres termes, ce niveau d'immersion et d'interaction est quantifiable par rapport aux caractéristiques des sens et des réponses motrices exploitées. À ce niveau des I^2 , les artefacts introduits (les interfaces, leurs drivers et un ou

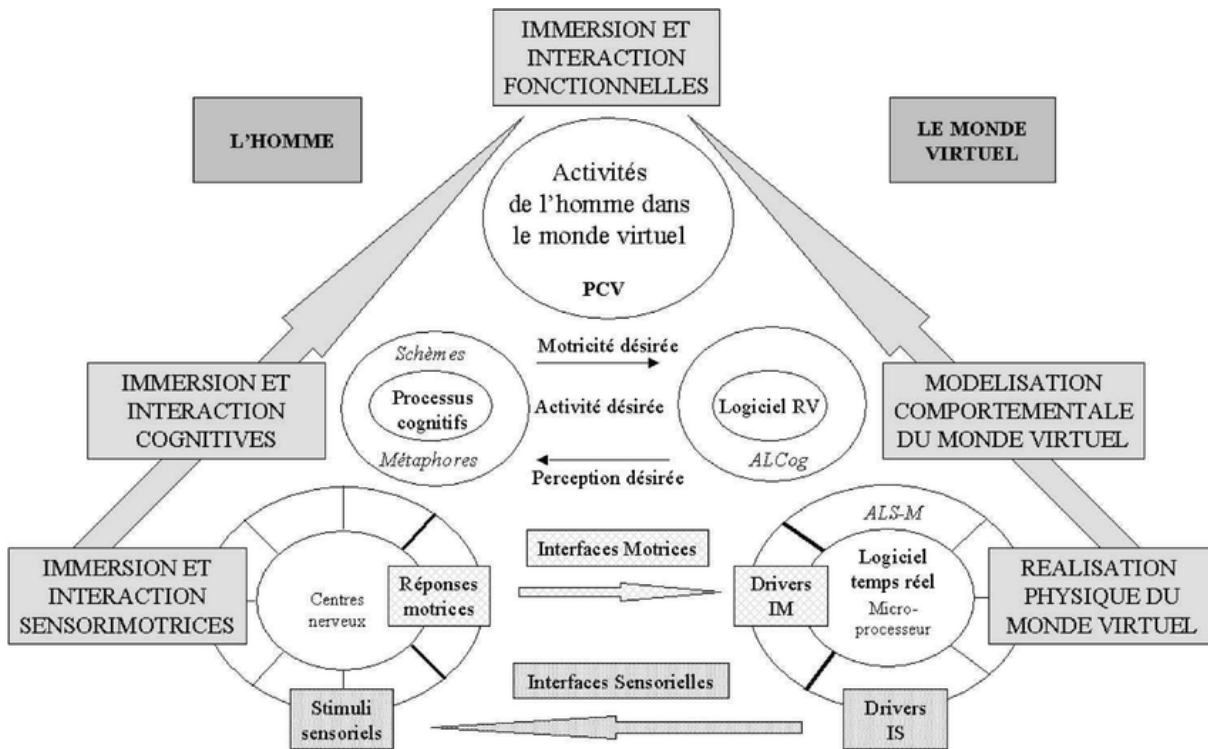


FIGURE 5.1: Schéma général à trois niveaux d'immersion et d'interaction [Fuc16]

plusieurs ordinateurs), induisant des temps de latence et des incohérences sensorimotrices, modifient la boucle « perception, décision, action » de l'utilisateur(cf. figure 2.9). Ce niveau est parfois exposé à certaines limites technologiques, par exemple les sens gustatif et olfactif sont peu exploités, il est également difficile de reproduire le retour d'effort (surtout pour des charges lourdes), etc [Lou01].

5.1.1.2 Les I^2 cognitives

Les I^2 cognitives correspondent aux processus cognitifs de l'interface. Il s'agit ici de comprendre quels sont les processus mentaux qui permettront à l'utilisateur de penser et agir dans le monde virtuel [Fuc16]. À ce niveau, on exploite les schèmes comportementaux importés (schème naturel) et les métaphores (avec ou sans substitution sensorielle) [Lou01, Fuc16]. La notion de schème est proposée par le psychologue Piaget [PCPPN79] et représente « l'organisation mentale des actions telles qu'elles se transforment ou se généralisent lors de la répétition de cette action en des circonstances semblables ou analogues ». Un schème correspond à une condition opératoire qui peut être décomposée en trois niveaux élémentaires [Lou01] : le but, les sous-buts et les modalités de réalisation. Dans un schème comportemental importé, l'utilisateur de l'ERV peut faire appel dans ses activités sensorimotrice et cognitive à certains automatismes qu'il a assimilés dans le monde réel en les mettant en œuvre dans le contexte

de l'activité à réaliser dans le monde virtuel [Fuc18]. En d'autres termes, l'utilisateur exploite le schème utilisé en Environnement Réel (ER) pour le même type de tâche dans le monde virtuel. Dans ce cas, le but, les sous-buts et les modalités de réalisation sont les mêmes dans l'ER et l'EV. À titre d'exemple, si on souhaite représenter le déplacement d'un utilisateur dans l'ERV en utilisant un schème comportemental importé, il est préférable d'utiliser comme interface comportementale un tapis de marche plutôt qu'un joystick. Cependant, il existe des cas où le joystick est préférable (par exemple pour les personnes à mobilité réduite qui ont l'habitude d'utiliser une télécommande pour piloter leur déplacement sur un fauteuil roulant). Entre autres, les difficultés économiques, techniques ou théoriques peuvent aussi obliger le concepteur à s'éloigner du schème naturel pour proposer une métaphore. Il s'agit ici d'exploiter des représentations abstraites ou symboliques de l'action ou de la perception souhaitée. Dans ce cas, le but de l'action reste le même, mais les sous-buts et les modalités de réalisations sont différents [Lou01]. Un exemple de métaphore permettant d'éviter de trop fortes incohérences sensorimotrices lors d'une navigation en EV est la téléportation [Fuc16]. Le tableau 5.1 reprend l'exemple du déplacement avec une métaphore dans l'ERV. L'exploitation de cette métaphore est présentée en détail dans le chapitre 6 de ce document.

TABLE 5.1: Représentation mentale du déplacement

Niveau	Environnement réel	Environnement virtuel
But	Le déplacement d'un point A vers un point B	Le déplacement par téléportation
Sous-but	Avancer le pied droit puis avancer le pied gauche et répéter l'action jusqu'au point B	Cibler une position avec le joystick, cliquer sur le bouton du joystick puis relâcher le bouton
Modalités de réalisation	Pieds	Joystick

D'après Lourdeaux [Lou01], pour choisir les représentations mentales (processus mentaux), il faut s'appuyer sur plusieurs critères principaux : (1) les objectifs visés par l'expérience ; (2) les limites technologiques (certaines actions en environnement réel sont difficiles, voire impossibles à réaliser en EV) ; (3) les limites économiques (i.e. la mise en œuvre d'une action dans l'environnement virtuel et le matériel utilisé peuvent générer des coûts très élevés) ; (4) le coût d'apprentissage (le temps et les moyens nécessaires à l'utilisateur pour s'approprier une fonctionnalité.) ; (5) l'expérience des utilisateurs (par exemple, les utilisateurs habitués à l'univers des jeux vidéo peuvent facilement utiliser un joystick).

De notre point de vue, étant donné la récurrence des usages la RV dans le domaine de l'apprentissage, notamment pour la FAD, il est utile d'ajouter aux 5 critères précédents un

sixième critère qui est l'évaluation des utilisateurs. Il s'agit ici de créer plusieurs prototypes d'une action donnée et de les soumettre aux utilisateurs finaux pour évaluation. Le concepteur peut par exemple utiliser une méthode itérative dans le but de prendre en compte les retours des utilisateurs finaux, et ainsi améliorer incrémentalement l'EV.

5.1.1.3 Les I^2 fonctionnelles

Les I^2 fonctionnelles correspondent à l'objectif global désiré dans l'EV. D'après Fuchs, il s'agit du point de départ de toute démarche de conception [Fuc16] qui doit décrire les activités (les fonctions) à réaliser par l'utilisateur. Ces activités peuvent être décomposées en des comportements de base appelés Primitives Comportementales Virtuelles (PCV). Ces PCV sont regroupés en quatre catégories : observer le monde virtuel ; se déplacer dans le monde virtuel ; agir sur le monde virtuel ; communiquer avec autrui ou avec l'application.

5.1.2 Les aides logicielles comportementales virtuelles

Les ALC désignent les aides logicielles destinées à faciliter l'utilisation des interfaces comportementales. À travers ces ALC, l'ordinateur aide les utilisateurs à employer efficacement les interfaces. Les ALC sont regroupées en 2 types : les unes sont plutôt orientées sur une aide sensorimotrice, les autres sur une aide cognitive (ALCog) [Fuc16].

Les Aides Logicielles Sensorimotrice (ALSM) servent à « améliorer l'interfaçage soit en augmentant la qualité des données transitant entre l'humain et l'ordinateur, soit en proposant une amélioration psychophysique des stimuli sensoriels ou des réponses motrices » [Fuc18]. Les Aides Logicielles Cognitives (ALCog) de motricité et de perception, associées aux PCV, apportent des facilités à l'utilisateur lors de la réalisation d'une tâche à accomplir dans EV. Elles sont axées soit sur une aide face aux incohérences sensorimotrices, soit sur une aide à l'utilisateur pour réaliser une tâche [Fuc16, Fuc18].

À titre d'exemple, dans le cas d'une ALSM, si le nombre de pixels dans le visiocasque est insuffisant pour lire un texte inscrit dans le monde virtuel, les lettres peuvent être exagérément agrandies. Dans le cas d'une ALCog, pour le déplacement dans les couloirs d'un bâtiment, les trajectoires possibles peuvent être prédéterminées pour simplifier les commandes de déplacement de l'utilisateur. D'autres exemples sont cités dans le livre de Fuchs sur les casques de réalité virtuelle et des jeux vidéo [Fuc16].

5.2 Les défis liés à la conception d'un VD-Learning

La conception d'un EVR pour la formation à distance fait émerger 4 défis majeurs : les défis techniques liés à la RV, les défis liés au confort et à la santé des utilisateurs, les défis liés à la tâche d'apprentissage, et enfin les défis spécifiques à la formation à distance. Nous examinons chacun d'entre eux dans la suite de cette section.

5.2.1 Les défis techniques liés à la RV

Les concepteurs d'ERV doivent faire face à plusieurs défis techniques. Certains de ces défis ont déjà été mentionnés dans les sections précédentes. De manière générale, ils peuvent être regroupés en trois catégories selon qu'ils sont liés à la conception de la visualisation, de la navigation, ou de l'interaction [CLT18].

5.2.1.1 Les défis liés à la visualisation

De nombreux facteurs importants doivent être pris en compte lors de l'affichage des visuels immersifs. L'utilisation combinée de composants logiciels et matériels joue un rôle lors de la création d'images 3D pour l'exploration. L'état de l'art réalisé par Chong *et al.* [CLT18] permet de lister les différents dispositifs utilisés pour la visualisation immersive, que nous présentons ici ainsi que les problèmes liés à chacun.

D'abord, nous avons les ordinateurs de bureau connectés à un moniteur (LCD ou LED) ou à un projecteur. L'utilisateur se sert des périphériques d'entrée (souris, clavier, joystick) [SDP+09] pour explorer l'ERV. Bien que l'utilisation d'un tel dispositif soit très familière, le problème principal est qu'il ne peut pas garantir un niveau d'immersion élevé.

Ensuite, les CAVE permettent aux utilisateurs de s'immerger dans l'EV, généralement à l'intérieur d'une salle dédiée. L'utilisation d'un CAVE entraîne généralement la limitation du mouvement et de la manipulation des objets virtuels à l'intérieur de EV. De plus, bien que la configuration d'un CAVE puisse offrir un niveau élevé d'immersion et d'engagement chez les utilisateurs, ce système peut être coûteux et complexe en termes d'installation matérielle. Il faut également un grand espace pour mettre en place le système [CB10].

Enfin, les visiocasques représentent l'un des dispositifs les plus utilisés grâce à leur coût accessible au grand public [ACB17] et leur portabilité. Il est cependant utile de prendre en compte les limites de ces dispositifs. Par exemple, le champ de vision des visiocasques est réduit par rapport à celui de l'œil humain [Fuc18]. Dans un visiocasque, le temps de traitement

des images entraîne parfois un léger décalage qui perturbe le sens de l'équilibre et suscite une sensation de malaise. On parle alors de cybercinétose ou de mal du virtuel (cf. section 5.2.2). L'optimisation des performances graphiques pour une visualisation en temps réel peut aussi conduire à une pixélisation des rendus et dégrader ainsi la qualité de l'expérience.

5.2.1.2 Les défis liés à navigation (déplacement)

La description de la navigation est présentée dans la partie 2.1.2.2 de ce document. Le déplacement pose des problèmes dus aux incohérences sensorimotrices qui peuvent être créées dans l'EV. Une incohérence sensorimotrice s'explique par exemple par le fait que l'utilisateur se déplace dans l'EV en gardant la même position dans l'ER. D'après Chong *et al.* [CLT18], dans un système de navigation, il faut aussi prendre en compte les problèmes liés : (1) à la sécurité (cf. section 5.2.2), surtout dans les zones restreintes pour effectuer des mouvements [OKM15]; (2) à la latence lors des actions de l'utilisateur dans l'EV, ce qui peut entraîner une expérience désagréable lorsqu'il explore l'EV, à moins qu'il ne soit déjà expert[MAG+12]; (3) au mauvais fonctionnement de certains systèmes tactiles dans un espace à 3 dimensions, ce qui explique la difficulté à effectuer une interaction pour naviguer dans un espace libre suivi par un dispositif sensoriel [ACB12]. Il faut aussi prendre en compte les contraintes de certains systèmes qui imposent un espace limité afin de reconnaître certains gestes de l'utilisateur ; si l'ERV n'intègre pas un bon système de navigation et manque de précision dans l'exécution des déplacements, cela pourra avoir un impact négatif sur l'expérience de l'utilisateur et conduire ainsi au rejet du système.

5.2.1.3 Les défis liés à l'interaction

Bien que plusieurs systèmes utilisent des systèmes de contrôle de geste similaires, les utilisateurs doivent effectuer certains gestes de conception qui sont proposés uniquement pour des tâches spécifiques au sein d'un EV. À titre d'exemple, dans une formation en chirurgie dans un ERV, certains gestes des apprenants sont spécifiques et doivent être précis pour se rapprocher de la réalité (cf. figure 5.2) [GFDSK+20]. Plusieurs défis sont mentionnés dans les travaux de recherche [CLT18] : (1) le manque de précision des technologies de suivi des mouvements (ce problème peut réduire l'acceptation de l'ERV ainsi que l'engagement et le sentiment de présence); (2) certaines technologies spécifiques comme Microsoft Kinect permettant de suivre le mouvement de tout le corps des utilisateurs, fonctionnent efficacement seulement à l'intérieur d'une pièce, ce qui exclut les espaces exposés à une source de lumière externe. De plus, pour reconnaître les gestes d'un utilisateur, la mise en place du système de suivi se fait dans un espace limité, ce qui exclut la possibilité d'un assistant (souvent utilisé pour guider les utilisateurs pendant l'expérience) car ces systèmes sont conçus pour accueillir

un seul utilisateur à la fois ; (3) certaines métaphores pour représenter des actions dans l'EV sont parfois mal perçues par les utilisateurs ou demandent une formation supplémentaire (pour s'approprier un geste en particulier). Dans certains cas aussi, les gestes naturels similaires au monde réel (schème comportemental importé) peuvent réduire le niveau d'apprentissage cognitif et minimiser les compétences de la mémoire.



FIGURE 5.2: Manipulation [GFDSK+20]

5.2.2 Les défis liés au confort et à la santé

Pour les besoins de nos travaux, nous nous limiterons aux problèmes liés à l'usage des visiocasques. D'après Fuchs [Fuc16], certaines catégories d'application RV peuvent créer des malaises, dont les causes sont multiples. Nous présentons ici à titre d'exemple les incohérences sensorimotrices, la perturbation de l'activité psychologique de l'utilisateur dans l'EV, un mauvais interfaçage entre le système visuel du sujet et le visiocasque, les dispositifs technologiques non-sécurisés.

5.2.2.1 Les incohérences sensorimotrices

Ces incohérences sont classées en trois sous-catégories [Fuc16] :

- L'absence d'un stimulus ou d'une réponse motrice en EV, par rapport à ce qui se produit dans un environnement réel. Cette absence peut se matérialiser dans certaines applications où on fait tourner l'EV sans que l'utilisateur, immobile dans l'environnement réel, ne tourne la tête de lui-même ; on parle alors d'incohérence visuo-motrice passive.
- Le découpage, c'est-à-dire une différence dans la relation entre deux sens ou entre un sens et une réponse motrice dans l'EV par rapport à ce qui se produit dans le monde réel. A titre d'exemple, au cours d'une manipulation, si la main réelle de l'utilisateur est mal localisée par rapport à la vision de la main dans le visiocasque (dans le cas où la main est représentée), on obtient une incohérence à laquelle l'utilisateur devra s'adapter. On parle d'incohérence visuo-manuelle.
- Le temps de latence qui se produit entre deux sens ou entre deux réponses motrices, par exemple la latence entre un mouvement de la tête de l'utilisateur et l'affichage du bon point de vue correspondant au mouvement sur l'écran du visiocasque. Il s'agit dans ce cas d'une incohérence visuo-motrice temporelle.

5.2.2.2 Perturbation de l'activité psychologique de l'utilisateur

L'utilisation abusive des visiocasques (immersion prolongée) peut avoir des conséquences psychologiques (manque de socialisation, confusion entre le monde réel et le monde virtuel, addiction, etc). Ces questions qui relèvent de la psychologie et de la psychiatrie ne sont pas traitées en détail dans le cadre de nos travaux. Notons cependant que les recherches dans ces domaines sont exploitables dans l'ingénierie des EVR.

5.2.2.3 Un mauvais interfaçage entre le système visuel du sujet et le visiocasque

On peut aussi noter des problèmes ophtalmologiques liés à l'observation d'une scène virtuelle *via* un dispositif optique non spécialement adapté aux caractéristiques visuelles de l'utilisateur.

Du point de vue ergonomique, le poids d'un visiocasque peut induire des symptômes physiques lorsque l'utilisateur porte le dispositif trop longtemps, les câbles qui relient certains visiocasques à l'ordinateur sont une gêne pour certains mouvements de la personne, etc.

5.2.2.4 Les dispositifs technologiques nos sécurisés

L'isolation visuelle et acoustique de l'utilisateur portant un visiocasque est le principal défi de sécurité. La sécurité physique de l'utilisateur est à prendre en compte s'il utilise la position debout dans une salle et non assise sur un siège fixe. Dans le cas de la position debout, son activité peut représenter un danger surtout si l'utilisateur doit se déplacer, même sur une petite distance. Le concepteur peut par exemple avertir l'utilisateur lorsqu'il s'approche d'un mur dans la pièce ou d'un obstacle quelconque. Si la personne est assise, il faut parfois aussi prévoir une sécurité spécifique ; par exemple si la plateforme sollicite beaucoup le corps de l'utilisateur, il faut prévoir une ceinture de sécurité. La confusion entre le monde réel et le monde virtuel peut aussi poser des problèmes de sécurité.

Il existe une multitude de solutions pour faire face à ces défis, nous ne les parcourons pas tous dans le cadre de nos travaux mais nous renvoyons encore une fois le lecteur au chapitre 8 du livre de Fuchs [Fuc16].

5.2.3 Les défis liés à l'apprentissage humain

D'après Tchounikine [Tch09b], les EIAH sont un champ scientifique pluridisciplinaire¹, interdisciplinaire² et transdisciplinaire³. À cet effet, il faut prendre en compte les défis liés aux différentes disciplines (principalement l'informatique, les didactiques, les sciences de l'éducation et la pédagogie, la psychologie, l'ergonomie, et les sciences de la communication) dans la conception d'un EIAH. En d'autres termes, le champ scientifique des EIAH, en tant que domaine complexe, ne peut pas être défini par une conceptualisation unique. La difficulté ici est liée au fait qu'« elle conduit les chercheurs travaillant sur les EIAH à mener leurs travaux sur la base de conceptualisations sous-jacentes très différentes ». De plus, le concepteur doit prendre en compte le fait qu'un EIAH ne crée pas une Situation d'Apprentissage (SA), il en est l'un des éléments. Ainsi, la façon dont l'apprenant perçoit, comprend ou utilise le logiciel qui lui est proposé ne peut pas être totalement anticipée. La conception d'un ERV pour l'apprentissage

1. Pluridisciplinarité : enrichissement d'une réflexion disciplinaire par l'apport d'autres disciplines (le problème est abordé à l'aide de plusieurs disciplines, mais dans un schéma de juxtaposition).

2. Interdisciplinarité : transfert et adaptation de méthodes d'une discipline à une autre (les apports respectifs et les croisements pouvant amener les disciplines à évoluer).

3. Transdisciplinarité : intégration de différentes approches scientifiques existantes en un cadre propre dépassant les cadres disciplinaires (élaboration de concepts ou de méthodes propres, etc.)

repose donc sur des hypothèses (qui seront éventuellement revues ou raffinées itérativement) quant à son usage et son effet. Dans la même lancée, pour Fuchs *et al.* [FMB06], le domaine de la RV appliquée à l'apprentissage doit faire face à plusieurs sources de complexité, parmi lesquelles la complexité liée à l'hétérogénéité et aux difficultés d'appréhension des processus de l'apprentissage humain, la complexité des environnements virtuels, la complexité et la multi-dimensionnalité des configurations sociotechniques où la RV s'insère. Pour ces auteurs, la conception des ERV pour l'apprentissage requiert une instrumentation et des méthodes permettant de maîtriser la complexité des processus à aborder, auxquelles s'ajoutent les difficultés telles que le besoin de faire converger des disciplines qui n'ont pas toujours l'habitude de coopérer de façon étroite, la récurrence des usages, l'originalité des problèmes, l'évaluation des démarches et des résultats sur des apprentissages qui sont encore peu documentés, etc.

5.2.4 Les défis spécifiques à la formation à distance

Si la section précédente couvre toutes les formes d'apprentissage, il est cependant important de prendre en compte les défis liés aux spécificités de la FAD dans la conception d'un VD-Learning. Sans chercher à être exhaustifs nous nous limitons ici aux deux défis majeurs généralement cités dans par plusieurs chercheurs : les défis liés à la distance (cf. section 3.3.3) et les défis liés à l'autonomie (cf. section 3.3.1.1).

5.3 Les différentes méthodologies de conception des ERV

La littérature scientifique présente plusieurs approches de conception d'ERV, dont certaines très génériques et pouvant par conséquent être utilisées dans plusieurs domaines (cf. section 5.3.1). D'autres approches sont spécifiques à un domaine précis. Dans ce contexte, nous nous intéressons principalement aux approches spécifiques au domaine de l'apprentissage (cf. section 5.3.2).

5.3.1 Les approches de conception d'ERV générales

5.3.1.1 La conception centrée opérateur humain

La Conception Centrée sur l'Opérateur Humain (CCOH) est « *une manière de concevoir les systèmes interactifs, ayant pour objet de rendre les systèmes utilisables et utiles en se concentrant sur les utilisateurs, leurs besoins et leurs exigences, et en appliquant les facteurs humains, l'ergonomie et les connaissances et techniques existantes en matière d'utilisabilité. Cette approche favorise l'efficacité et l'efficience, améliore le bien-être de l'homme ainsi que la satisfaction des utilisateurs, l'accessibilité et la durabilité, et réduit les effets néfastes potentiels* ».

de leur utilisation sur la santé humaine, la sécurité et les performances ». Cette approche a été formalisée par l'Organisation Internationale de la Normalisation (ISO) et mise à jour pour la dernière fois en 2019 sous le label 9241-210 [fS19]. L'utilisation de la CCOH pour concevoir un système interactif permet d'augmenter la productivité des utilisateurs et l'efficacité opérationnelle des entreprises ; de réduire les frais de formation et d'assistance technique ; d'augmenter l'utilisabilité (efficacité, efficacité et satisfaction) ; d'accroître l'accessibilité (pour les personnes appartenant à une population ayant le plus large éventail possible de besoins, de caractéristiques et de capacités des utilisateurs) ; de renforcer l'expérience des utilisateurs ; de réduire l'inconfort et le stress ; de contribuer à l'atteinte d'objectifs de durabilité. De plus, selon la norme ISO, l'adoption de la CCOH peut réduire le risque que le produit ne satisfasse pas aux exigences ou soit même rejeté par les utilisateurs. Une CCOH doit suivre cinq grands principes : la conception est fondée sur une compréhension explicite des utilisateurs, des tâches et des environnements ; les utilisateurs sont impliqués tout au long du processus de conception et de développement ; la conception est dirigée et affinée par l'évaluation centrée sur l'utilisateur ; le processus est itératif ; la conception couvre l'expérience de l'utilisateur dans son intégralité. La norme ISO décrit quatre activités (cf. figure 5.3) à réaliser dans un processus de CCOH. Il s'agit de : (1) comprendre et spécifier le contexte d'utilisation ; (2) Spécifier les exigences de l'utilisateur ; (3) produire des solutions de conception visant à satisfaire ces exigences ; (4) évaluer les conceptions par rapport aux exigences.

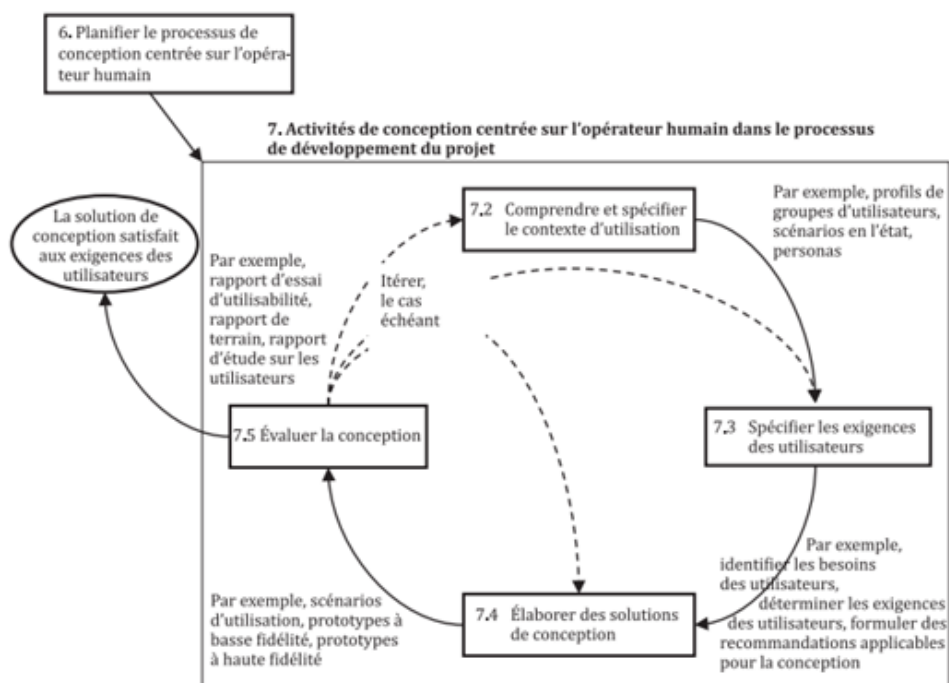


FIGURE 5.3: Interdépendance des activités de conception centrée sur l'opérateur humain [fS19]

5.3.1.2 L'approche générale de conception de Lourdeaux

L'approche générale de conception de Lourdeaux [Lou01] est basée sur le modèle général de conception décrit dans la section 5.1.1. Cette méthodologie de conception se décline en six étapes itératives dépendantes les unes des autres, certaines pouvant remettre en question les étapes précédentes.

Étape 1 : la spécification des objectifs que l'on souhaite atteindre en immergeant un utilisateur dans l'environnement de RV. Il s'agit ici de spécifier les I^2 fonctionnelles de l'environnement avant de réfléchir aux interfaces comportementales à employer pour immerger physiquement l'utilisateur dans l'environnement (par exemple construire un modèle conceptuel de la tâche).

Étape 2 : la spécification des PCV qui consiste à spécifier, en fonction des objectifs désirés, les fonctionnalités de l'environnement nécessaires aux raisonnements et comportements de l'utilisateur. Une tâche dans l'environnement est décomposable en un nombre restreint de comportements de base, chaque action élémentaire représentant un PCV. L'objectif de cette étape est de spécifier les PCV utiles à la reproduction des raisonnements et des comportements nécessaires à l'action.

Étape 3 : la spécification des représentations mentales qui consiste à déterminer, pour chacune des PCV, les représentations mentales à utiliser pour les interactions de l'utilisateur dans l'ERV. Différentes solutions peuvent être proposées pour chaque PCV (schème habituel, schème transposé ou métaphore).

Étape 4 : La spécification des représentations comportementales qui consiste à spécifier les interfaces comportementales adéquates et l'environnement physique. En d'autres termes, il s'agit de spécifier les I^2 sensorimotrices et les caractéristiques « métrologiques » des interfaces utilisées en fonction des caractéristiques « psychophysiques ». Pour l'auteur, le choix des représentations mentales (étape 3) et des représentations comportementales (étape 4) est effectué en fonction des objectifs de l'application, des limitations technologiques ou économiques, du coût d'apprentissage et de l'expérience des utilisateurs.

Étape 5 : La spécification du dialogue des interfaces qui consiste à spécifier les modes et dialogues des interfaces choisies et les ALC nécessaires. Pour l'auteur, l'ensemble de ces dialogues et de ces ALC permettent de spécifier l'autre partie des I^2 cognitives liées aux interfaces.

Étape 6 : L'évaluation qui consiste à réaliser des tests à mener en parallèle avec les précédentes étapes ou itérativement. D'après l'auteur, trois types d'évaluation sont menés : l'évaluation de l'utilisabilité des interfaces par les utilisateurs finaux (apprenants et enseignants) permettant d'une part de quantifier l'adéquation entre les caractéristiques métrologiques du système et les caractéristiques psychophysiques de l'utilisateur, et d'autre part de quantifier et qualifier les comportements effectifs d'utilisation des interfaces, pour vérifier s'ils correspondent à ceux désirés et programmés. En d'autres termes, on évalue la charge mentale nécessaire pour utiliser les interfaces afin de les améliorer si nécessaire. Les tests cognitifs et comportementaux permettent de quantifier et qualifier l'activité de l'utilisateur dans l'environnement virtuel non pas du point de vue de l'utilisation des interfaces, mais de l'action à réaliser dans l'ERV. Enfin les tests fonctionnels permettent de vérifier si l'environnement virtuel permet d'atteindre l'objectif déterminé.

5.3.1.3 L'approche de conception de Fuchs

Une autre approche de conception des ERV est décrite par Fuchs dans son livre sur la théorie de la réalité virtuelle [Fuc18]. Cette approche se base aussi sur le modèle de référence de conception décrit à la section 5.1.1. Elle est similaire à l'approche de Lourdeaux [Lou01] et se décline en 5 étapes de conception et trois étapes d'évaluation.

Étape 1 : Déterminer les I^2 fonctionnelles qui consiste à spécifier l'objectif global de l'application, c'est-à-dire l'objectif visé par l'expérience. D'après Fuchs, cette étape demande beaucoup de rigueur et s'avère longue et délicate dans bien des cas. À titre d'exemple, dans un contexte d'apprentissage, cette étape consiste à définir les objectifs pédagogiques que l'on souhaite atteindre en immergeant l'apprenant dans l'expérience de RV.

Étape 2. Déterminer les Actions Comportementales Virtuelles (ACV). A partir des I^2 fonctionnelles désirées, on détermine les ACV utiles. Il s'agit ici de décomposer les actions de l'utilisateur en quelques comportements de base. Rappelons que ces comportements peuvent être regroupés en quatre catégories : observer le monde virtuel, se déplacer dans le monde virtuel, agir sur le monde virtuel (principalement manipuler des objets), communiquer avec autrui ou avec l'application.

Étape 3 : Concevoir les interfaces comportementales virtuelles. L'objectif de cette étape consiste à déterminer les processus mentaux qui permettront à l'utilisateur de penser et d'agir dans l'environnement. En d'autres termes, pour chaque ACV, on détermine soit un schème comportemental importé (schème naturel) si c'est possible, soit une métaphore s'il n'existe pas de schème naturel ou si le schème naturel est compliqué à mettre en place. En

même temps, on détermine à cette étape les sens et/ou les réponses motrices et les interfaces comportementales associées au processus cognitif choisi. Les caractéristiques métrologiques des interfaces matérielles doivent être compatibles avec les caractéristiques psychophysiques des sens et des réponses motrices en rapport avec les I^2 sensorimotrices recherchées.

Étape 4 : Concevoir les ALC qui permettront d'améliorer les I^2 cognitifs et les I^2 sensorimotrices. Les ALC sont présentées en détail dans la partie 5.1.2.

Étape 5 : concevoir le logiciel RV, ce qui consiste à modéliser l'ERV, à programmer les ALC, etc.

D'après Fuchs [Fuc18], l'évaluation d'un système de ERV doit être basée sur le modèle général à trois niveaux décrit dans la section 5.1.1 (elle ne consiste donc pas uniquement en une évaluation globale de l'application) :

- **L'évaluation au niveau des I^2 sensorimotrices** : il s'agit ici d'évaluer que les caractéristiques métrologiques de l'interface matérielle correspondent aux caractéristiques maximales psychophysiques des sens et des réponses motrices de la personne.
- **L'évaluation au niveau des I^2 cognitives** : il s'agit ici d'évaluer les processus mentaux utilisés pour chaque ACV (schème comportemental importé ou métaphore). Bien que cette évaluation soit difficilement quantifiable, l'auteur propose d'utiliser par exemple le temps d'apprentissage comme indicateur dans cette évaluation.
- **L'évaluation des I^2 fonctionnelles** : il s'agit ici d'évaluer que le système répond au besoin fonctionnel.

5.3.2 Les approches de conception d'ERV spécifiques à l'apprentissage

5.3.2.1 L'approche de conception d'ERV spécifique à l'apprentissage de Lourdeaux

Lourdeaux [Lou01] propose une déclinaison de son approche dans le contexte d'apprentissage qui se décline en 5 étapes :

Étape 1) spécifier les objectifs pédagogiques : Cette étape consiste à spécifier les situations didactiques pertinentes et déterminer la manière dont elles doivent être menées par le formateur. Il s'agit donc de spécifier les I^2 fonctionnelles, i.e. construire un modèle conceptuel de la tâche de formation et un modèle conceptuel de la tâche à enseigner.

Étape 2) spécification de l'ERV pédagogique pour l'apprenant : Cette étape consiste à spécifier les PCV, les représentations mentales, les interfaces comportementales et les dialogues d'utilisation d'interface pour l'apprenant.

Étape 3) spécification de l'ERV pour le formateur : Cette étape consiste à spécifier les PCV, les représentations mentales, les interfaces comportementales et les dialogues d'utilisation d'interface pour l'enseignant.

Étape 4) tests d'utilisabilité et cognitifs : Cette étape réalisée en parallèle avec les autres étapes consiste à mener les tests d'utilisabilité (utilisation des interfaces par les apprenants et les formateurs) ; les tests cognitifs et comportementaux (quantifier et qualifier les raisonnements et les comportements effectifs au niveau de l'activité, i.e. s'ils correspondent ou non à ceux attendus) ; les tests fonctionnels (qualifier et quantifier le transfert de connaissances et de compétences acquises en EV dans le monde réel).

5.3.2.2 L'approche de conception d'un ERV spécifique pour l'apprentissage de Loup-Escande

Loup-Escande [LEJR+16] propose une autre approche de conception basée sur la CCOH qui implique les utilisateurs finaux dans le processus de conception. Cette approche se décline en 3 grandes étapes :

Étape 1) Caractériser les contextes d'usage : il s'agit d'identifier les structures utilisatrices de la solution et formuler les préconisations sur l'intégration physique et pédagogique de la plateforme.

Étape 2) Analyser les exigences des utilisateurs : il s'agit de co-construire les scénarios pédagogiques intégrant les futures technologies et de prendre en compte les recommandations pour l'ergonomie du dispositif de la RV.

Étape 3) Évaluer les solutions développées : il s'agit ici d'évaluer l'utilité et l'utilisabilité perçues, de l'expérience utilisateur et de l'acceptabilité des preuves de concepts. On évalue également l'utilisabilité des prototypes et l'appropriation des solutions finalisées implantées dans les structures cibles.

5.4 Formalisation d'une approche de conception d'un VD-Learning

Dans cette section, nous allons formaliser une approche de conception des VD-Learning. Notre approche se base sur le modèle général de conception utilisé par les chercheurs de la communauté française. Étant donné la récence des usages de la RV dans le domaine spécifique de l'apprentissage, nous proposons d'impliquer les utilisateurs finaux dans le processus de conception conformément aux recommandations de la CCOH. Ainsi nous proposons une boucle spécification-prototypage-évaluation. Nous intégrons aussi les spécificités des FAD dans le processus de conception. Notre approche se décline en 4 étapes : (1) spécifier le contexte d'utilisation ; (2) spécifier le VD-Learning ; (3) concevoir les prototypes ; (4) évaluer les solutions.

5.4.1 Etape 1 : Spécifier le contexte d'utilisation et les objectifs pédagogiques

La première étape de conception d'un VD-Learning consiste à spécifier le contexte d'utilisation et les objectifs pédagogiques. Cette étape correspond à la spécification des I^2 fonctionnelles. Il s'agit de définir le ou les objectifs que l'on souhaite atteindre à travers l'immersion et les interactions des apprenants dans le VD-Learning. Cette étape est longue et complexe ; elle fait appel à la fois aux compétences techniques et pédagogiques, parfois appelées technopédagogiques⁴). Pour aborder cette étape, nous proposons de la décliner en 4 sous-étapes : spécifier les objectifs pédagogiques, définir les profils des utilisateurs finaux, définir les situations d'apprentissages, définir les distances à apprivoiser.

5.4.1.1 Sous-étape 1.1 : Spécifier les objectifs pédagogiques

Pour concevoir un VD-Learning, il est important de définir les objectifs pédagogiques, i.e. les résultats que l'on souhaite atteindre en immergeant les apprenants dans l'EV. D'après la taxonomie de Bloom [B⁺56], ces objectifs pédagogiques peuvent être cognitifs (connaissance et savoir-faire intellectuels), psychomoteurs (habileté, savoir-faire gestuels) et affectifs (attitudes et savoir-faire sociaux, état d'esprit). La taxonomie des objectifs éducationnels de Bloom est composée des six niveaux : la connaissance, la compréhension, l'application, l'analyse, la synthèse et l'évaluation. Cette taxonomie a été révisée par Anderson et Krathwohl [ALGA01] (cf. figure 5.4)

4. La technopédagogie est la science qui étudie les méthodes d'enseignement intégrant les nouvelles technologies de l'information et de la communication (Source : http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/fiche0qlf.aspx?Id_Fiche=8360644)

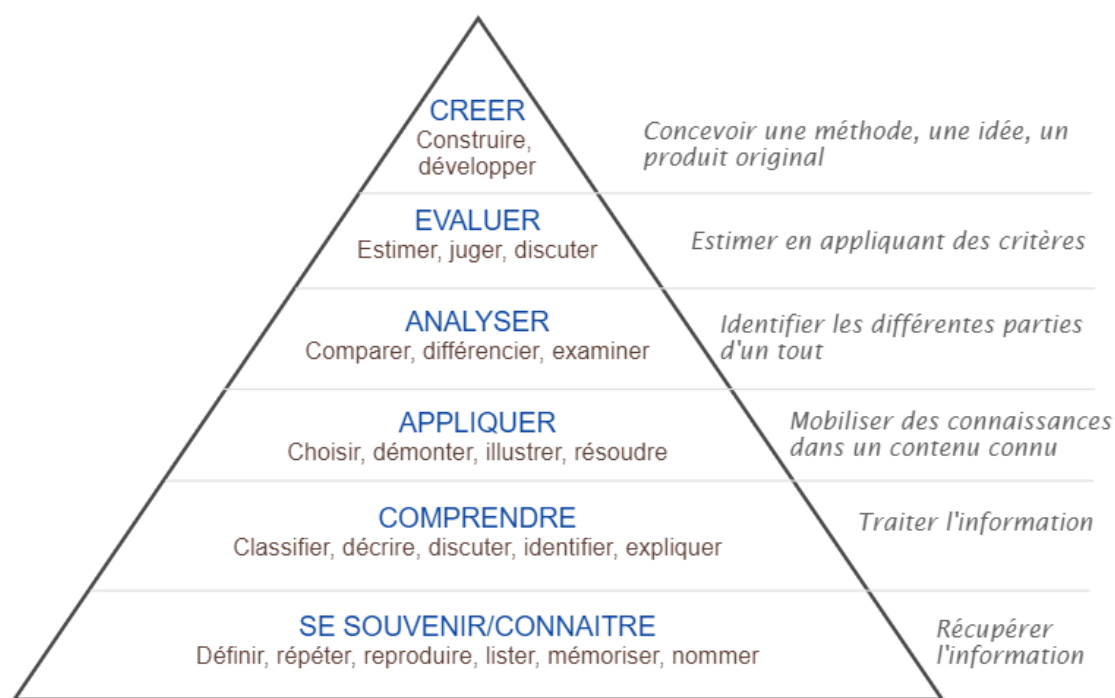


FIGURE 5.4: Figure 22 : Taxonomie de Bloom [B+56] révisée par Anderson et Krathwohl [ALGA01]

5.4.1.2 Sous-étape 1.2 : Définir les profils des publics cibles

Les publics cibles correspondent aux utilisateurs finaux à qui l'EV est destiné. Ces utilisateurs sont d'une part les formateurs et d'autre part les apprenants, que nous désignerons par la suite par le terme "utilisateurs finaux". Connaître les utilisateurs finaux oriente les concepteurs dans le choix des situations d'apprentissage et le choix des solutions de conception. De notre point de vue, un artefact conçu pour un groupe d'utilisateurs n'est pas forcément adapté pour un autre groupe. Il est donc indispensable dès le début de la conception de bien définir les profils des utilisateurs finaux de l'application RV. Nous nommerons ces profils les personas⁵. D'après la CCOH [fS19], les personas sont déterminés en fonction des caractéristiques du public cible et peuvent inclure les connaissances, les compétences, l'expérience, l'éducation, la formation, les caractéristiques physiques, les habitudes, les préférences et les aptitudes.

Concernant les apprenants, le concepteur peut aussi utiliser les profils cognitifs de Kolb [Cha03] pour construire ces personas. Kolb propose quatre types d'apprenants (cf. figure 5.5) : le Divergent (Concret-Réflexif) caractérisé par sa capacité d'imagination et son « intelligence

5. Un persona est, dans le domaine marketing, un personnage imaginaire représentant un groupe ou segment cible dans le cadre du développement d'un nouveau produit ou service ou d'une activité marketing prise dans sa globalité.

émotionnelle » ; le Convergent (Abstrait-Actif), qui se plaît à appliquer les idées ; l'Accommodateur (Concret-Actif), qui préfère les faits à la théorie et l'action à la méditation ; l'Assimilateur (Abstrait-Réflexif), intéressé par les concepts et les théories.

<p>Accommodateur - Dynamique Manipulateur – Intuitif Pragmatique Expérience concrète et expérimentation active Application de l'idée/action fondée sur l'expérience S'adapte aux nouvelles expériences et trouve les solutions Apprentissage par manipulation, exécution de tâches Fonctionne par essais/erreurs plutôt que logique Formation dans le domaine technique ou pratique <i>Apprécie les exercices en petit groupe</i></p>	<p>Divergent - Innovateur Observateur - Intuitif Réflexif Expérience concrète et observation réfléchie Expérience concrète et réflexion Sens de l'observation Apprécie les activités novatrices Imagination fertile A l'aise dans les sessions de Brainstorming Importance aux sentiments Emotif Spécialisation dans le domaine artistique <i>Apprécie d'apprendre par l'expérience</i></p>
<p>Convergent - Pratique Penseur Expérimentateur Méthodique Pragmatique Conceptualisation abstraite et expérimentation active Mise en application de l'idée/action Mettre en pratique les idées et les théories Etre pratique Peu émotif Résoudre des problèmes à résolution unique Se spécialise en Sciences Physiques Mode d'apprentissage des ingénieurs <i>Apprécie les activités et projet autogérés</i></p>	<p>Assimilateur - Analytique Méthodique réflexif Conceptualisation abstraite et observation réfléchie Réflexion sur une expérience Création des modèles théoriques Peu d'intérêt aux applications pratiques des connaissances, de la théorie Réorganisation logique de l'information en une explication cohérente Jongle avec les idées et théories Apprentissage caractéristique en sciences de base et mathématiques <i>Apprécie les cours théoriques</i></p>

FIGURE 5.5: Profils cognitifs de Kolb

Dans un contexte de formation à distance, Dussarps [Dus14] propose de prendre aussi en compte le profil socioaffectif des apprenants en dehors de la formation. Le niveau d'autonomie, le niveau de connaissances en 3D, la familiarité avec les jeux vidéo ou encore la connaissance et l'utilisation de visiocasques peuvent aussi constituer des sources d'information. Par exemple, les utilisateurs habitués aux jeux vidéo pourront rapidement s'approprier des métaphores (cf section 5.1.1.2) généralement utilisées pour certains processus cognitifs.

Du point de vue des enseignants, il est important de prendre en compte les compétences

dans l'utilisation des outils numériques dans un contexte de FAD. Les enseignants habitués à l'utilisation des outils numériques pourront rapidement s'approprier des interfaces.

5.4.1.3 Sous-étape 1.3 : Définir les SA

La définition d'une SA est basée sur deux notions importantes : à qui la SA est destinée (l'apprenant), et le but de la SA (l'objectif pédagogique). En d'autres termes, les SA définies doivent à la fois répondre aux objectifs pédagogiques et correspondre aux personas. La prise en compte de ce double objectif pourra garantir l'utilité et l'utilisabilité du VD-Learning. De plus, si les compétences et les préférences des utilisateurs sont également prises en compte, cela pourra réduire le rejet de l'application et conduire à l'acceptabilité voire à un état de flow (cf. section 5.1.1.2). À titre d'exemple, pour définir les SA à concevoir, le concepteur peut commencer par établir une liste exhaustive et priorisée des SA en fonction des objectifs pédagogiques définis. Ensuite cette liste subira une seconde priorisation en fonction des personas définis. Enfin, les SA seront choisies en fonction de cette double priorisation (cf. figure 5.6).

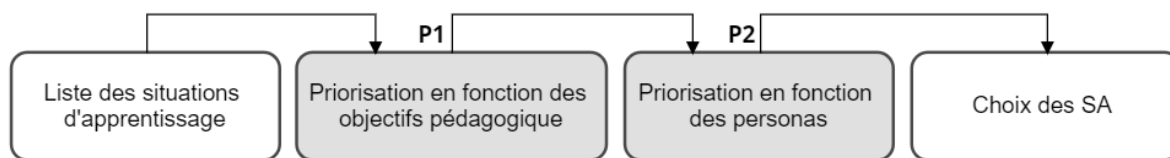


FIGURE 5.6: Priorisation des SA

5.4.1.4 Sous-étape 1.4 : Définir les distances à apprivoiser

Nous avons vu dans la section 3.3.3 que, dans une FAD, la distance pouvait se manifester chez l'apprenant sur plusieurs dimensions. Cette spécificité propre aux modalités de FAD doit être prise en compte dans le processus de conception [Pui19], car elle conditionne l'efficacité et l'acceptabilité du VD-Learning. Chaque dimension de la distance peut représenter une opportunité ou une menace dans l'atteinte des objectifs pédagogiques. Cette sous-étape consiste donc à identifier pour chaque SA choisie les distances qui pourraient se manifester chez les apprenants. Cette sous-étape pourra être affinée pendant la spécification des représentations mentales. À titre d'exemple, si le concepteur spécifie une métaphore pour une PCV, il doit vérifier si cette métaphore pourra être à l'origine d'une distance technologique chez les utilisateurs finaux. Finalement, cette sous-étape permet aux concepteurs de prendre en compte les composantes de la distance afin de les intégrer dans le processus de conception.

En résumé, la spécification du contexte d'utilisation et des objectifs pédagogiques représente une étape longue et très importante dans la conception d'un VD-Learning. Les objectifs pédagogiques doivent être clairement spécifiés et serviront d'indicateur pour évaluer l'utilité du VD-Learning (12 fonctionnelles). Impliquer les utilisateurs finaux dès le début de la conception pourra améliorer l'utilisabilité et la satisfaction, et conduire les apprenants dans un état de flow pendant la réalisation de la SA.

5.4.2 Etape 2 : Spécifier le VD-Learning

Cette étape correspond à la spécification des I^2 cognitives, des I^2 sensorimotrices et des ALC. Dans l'approche de Lourdeaux, cette étape est séparée en deux sous-étapes, la spécification de l'ERV pour les apprenants et la spécification des ERV pour le formateur. Dans un contexte de VD-Learning, bien que certaines fonctionnalités soient spécifiques aux formateurs, nous considérons que toutes les PCV destinées aux apprenants sont aussi utilisables par les formateurs. Suivant cette hypothèse, nous faisons le choix de réaliser une seule spécification en précisant les tâches spécifiques aux formateurs. Nous proposons de décliner cette étape en cinq sous-étapes pour spécifier les IHM, les PCV, les représentations mentales pour chaque PCV, les interfaces comportementales, et enfin les ALC. Un exemple de spécification d'un VD-Learning collaboratif est présenté dans le chapitre 6.

5.4.2.1 Sous-étape 2.1 : Spécification des interfaces IHM

Cette sous-étape consiste à spécifier l'ensemble des fonctionnalités qui sont réalisées en dehors de l'EV. Ces fonctionnalités seront accessibles sur un ordinateur via un navigateur web ou un client lourd⁶. La plupart des ERV actuels (voir section 6.1) proposent une interface web pour certaines fonctionnalités, par exemple des actions de paramétrage de l'EV comme le choix d'une salle virtuelle, le choix de la représentation des avatars si le système propose plusieurs représentations possibles, la gestion de comptes utilisateurs (inscription, configuration du compte, réinitialisation du mot de passe), l'import des contenus pédagogiques (PDF, photos, modèles 3D), etc. L'utilisation des IHM pour réaliser ces fonctionnalités peut réduire considérablement le temps d'apprentissage de l'outil aussi bien pour les apprenants que pour les formateurs, en particulier si les utilisateurs sont habitués à l'utilisation d'un ordinateur, et ainsi dans certains cas réduire la distance technologique.

6. Le terme « client lourd » (en anglais « fat » ou « heavy client »), par opposition au client léger, désigne une application cliente graphique exécutée sur le système d'exploitation de l'utilisateur (Source : <https://www.commentcamarche.net/contents/219-reseaux-client-lourd>)

5.4.2.2 Sous-étape 2.2 : Spécification des PCV

Les PCV sont spécifiées pour chaque SA et en fonction du rôle de l'apprenant et/ou des enseignants dans la SA. La place de l'utilisateur dans l'expérience est décrite par son existence dans l'EV (l'utilisateur est soit participant soit observateur) et de son influence sur l'EV (l'utilisateur est soit passif ou soit actif). Ainsi, nous en déduisons donc les quatre postures suivantes : Observateur Passif, Observateur Actif, Participant Passif et Participant Actif (cf. figure 5.7) [Fuc18].

- L'observateur passif n'existe pas dans l'expérience. Il ne peut ni se déplacer, ni agir sur l'expérience ; il est simple spectateur. Nous pouvons par exemple citer le visionnage d'une vidéo 360°. Nous ne considérons pas ce cas comme une véritable expérience de RV car d'après notre définition, une application est dite de RV lorsque l'utilisateur immergé peut agir dans un EV. Pour ce premier cas, la PCV principale est « observer le monde virtuel ».
- L'observateur actif n'existe pas dans l'expérience mais il peut réaliser des interactions de base. Il peut par exemple se déplacer d'une position à l'autre, interagir sur certains objets du monde virtuel (afficher/masquer un objet, manipuler un effet sonore, etc), comme dans une visite virtuelle. La PCV principale dans ce cas est « observer le monde virtuel », mais la PCV « agir sur l'expérience » peut aussi être envisagée. Bien que l'utilisateur puisse changer de position, nous ne considérons pas cette action comme une navigation car celle-ci suppose l'existence de l'utilisateur dans l'EV.
- Le participant passif existe dans l'expérience et est immergé dans le monde virtuel. Il peut se déplacer dans l'environnement, mais toutes les autres interactions sont impossibles. Comme dans le domaine cinématographique, il s'agit d'une forme de figurant⁷. Les PCV de ce cas sont « observer l'EV » et « se déplacer dans l'EV ».
- Le participant actif existe dans l'expérience. Il est immergé dans le monde virtuel et peut réaliser des actions. Dans ce cas, la SA peut faire appel aux quatre catégories de PCV : observer, se déplacer, agir et communiquer avec autrui dans le monde virtuel.

5.4.2.3 Sous-étape 2.3 : Spécification des représentations mentales

Les représentations mentales représentent les I^2 cognitives. L'objectif de cette sous-étape est de définir pour chaque PCV les représentations mentales adaptées (soit des schèmes naturels, soit des métaphores), décrites en détail dans la section 5.1.1.2. De notre point de vue, la charge mentale (quantité maximale de ressources cognitives, c'est-à-dire un ensemble de fonctions cognitives de haut et de bas niveau que peut mobiliser l'individu en vue de

7. Figurant : Personne, groupe, pays qui fait seulement acte de présence, sans jouer aucun rôle réel (Larousse).

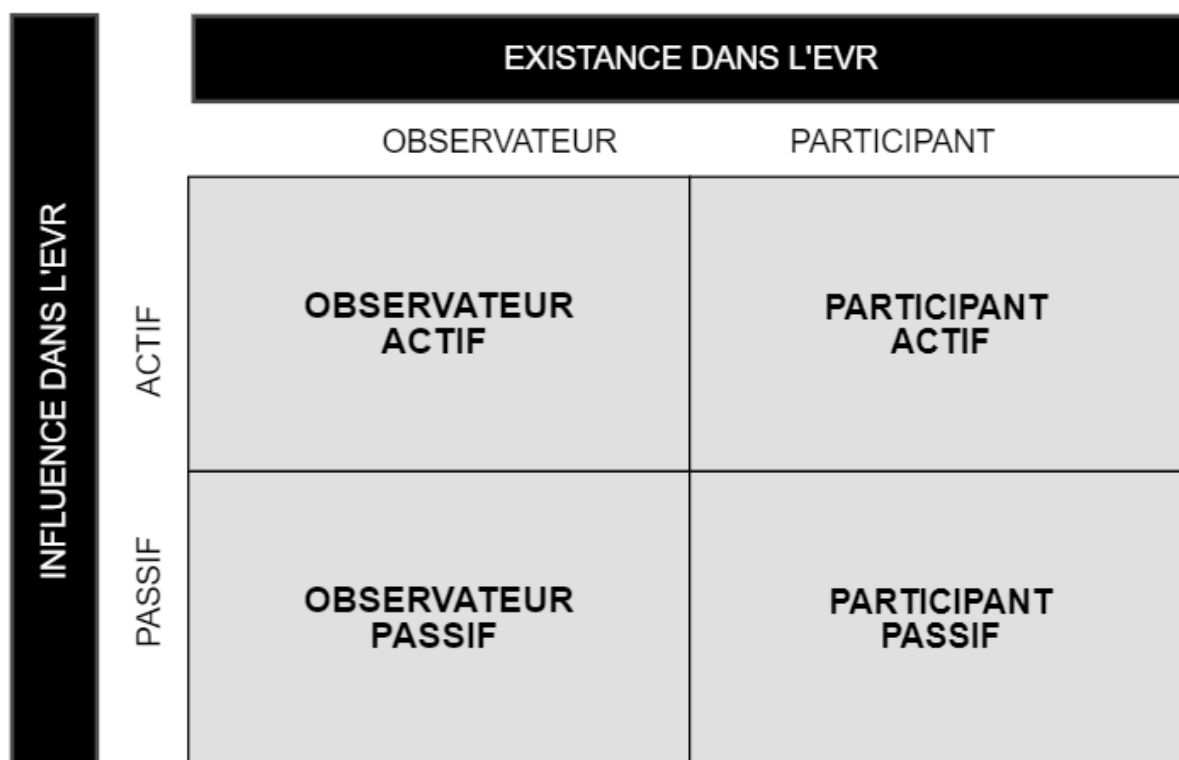


FIGURE 5.7: La place de l'utilisateur dans l'expérience

réaliser une tâche [Ver18]) pour réaliser les actions dans le VD-Learning doit être faible afin de permettre à l'utilisateur de se concentrer sur la tâche d'apprentissage. Nous suggérons de produire rapidement les prototypes (étape 3) de chaque représentation mentale afin de les évaluer avec les utilisateurs finaux [fS19].

Les exemples de représentation mentale pour les PCV d'observation, de déplacement, de manipulation des objets dans le monde virtuel et de communication avec les autres apprenants sont décrits dans le chapitre 6.

5.4.2.4 Sous-étape 2.4 : Spécification des interfaces comportementales

L'objectif de cette étape est de choisir les interfaces comportementales pour chaque PCV. Il s'agit ici de décrire la correspondance entre les caractéristiques métrologiques des interfaces utilisées, les caractéristiques psychophysiques des sens et des réponses motrices de l'utilisateur.

Dans cette sous-étape, il convient de prendre en compte le contexte du projet et les contraintes économiques. En effet, le choix d'interfaces matérielles coûteuses pourrait créer une distance économique pour certains groupes d'apprenants. Nous présentons les détails de ces interfaces dans le chapitre 6 dans le cadre de la spécification d'un VD-Learning collaboratif.

5.4.2.5 Sous-étape 2.5 : Spécification des aides ALC

Les 5.1.2 sont décrites dans la section 5.1.2. Ici encore dans le contexte d'un VD-Learning, nous suggérons de produire rapidement les prototypes des 5.1.2 afin de les faire évaluer par les utilisateurs finaux.

5.4.3 Etape 3 : Concevoir les prototypes

Un prototype est la « *représentation de tout ou partie d'un système interactif qui, bien que plus ou moins limitée, peut être utilisée à des fins d'analyse, de conception et d'évaluation* » [fS19]. D'après l'approche CCOH, l'utilisation de scénarios, simulations, modèles, maquettes ou d'autres formes de prototypes permet aux concepteurs de communiquer la conception proposée aux parties prenantes afin d'obtenir un retour d'information.

Cette étape est réalisée en parallèle avec les étapes 2 et 4. Chaque représentation mentale, chaque 5.1.2 et chaque interface comportementale spécifiée est conçue sous forme de prototype et soumise pour évaluation aux utilisateurs finaux. Les solutions de création de prototypes ?? sont présentées dans la section 5.5.

Pendant le prototypage, on applique une approche itérative afin d'éliminer progressivement l'incertitude au cours du développement du VD-Learning. Cette approche implique que l'obtention de nouvelles informations entraîne la révision des spécifications, afin de réduire le plus possible le risque de non-satisfaction des exigences des utilisateurs par le système en cours de développement. Nous avons donc une boucle de conception spécification-prototypage-évaluation, dont la sortie est conditionnée à la validation par les utilisateurs finaux (voir figure 5.8).

5.4.4 Etape 4 : Évaluer les solutions réalisées

L'objectif de cette étape est d'évaluer l'utilisation de l'environnement par les utilisateurs finaux, de quantifier et qualifier les comportements effectifs d'utilisation des interfaces. Notre évaluation est basée sur le modèle général de la RV décrite dans la section 5.1.1, et ne se limite pas à l'évaluation globale puisque nous proposons d'évaluer l'utilisabilité, l'utilité et l'expérience utilisateur.

5.4.4.1 Evaluation de l'utilisabilité

Comme nous l'avons défini à l'étape précédente, l'évaluation de l'utilisabilité fait partie de la boucle spécification-prototypage-évaluation. Elle consiste à évaluer chaque représentation mentale (schème naturel ou métaphore), chaque interface comportementale et chaque ALC

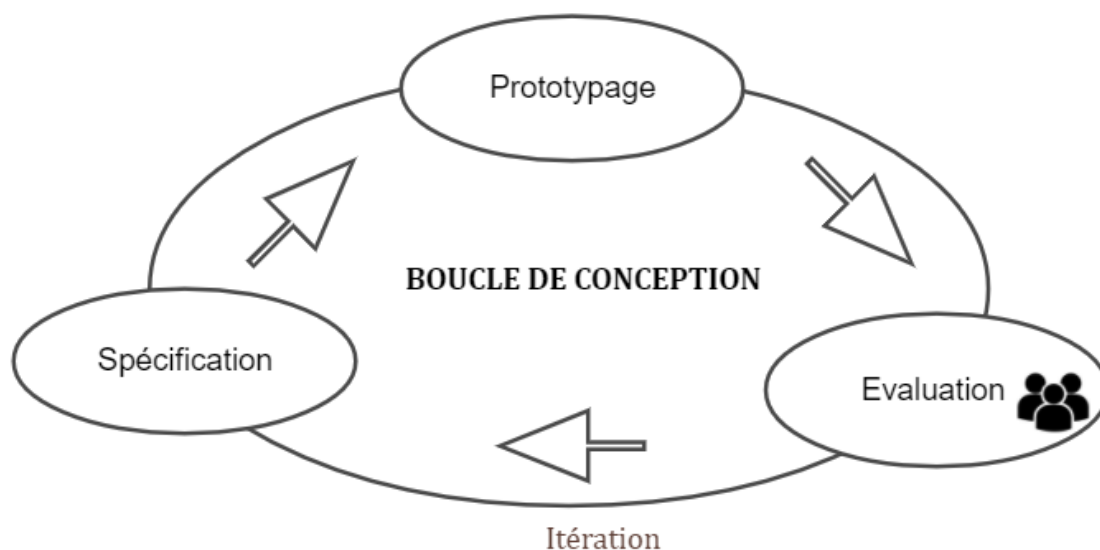


FIGURE 5.8: Boucle de conception spécification-prototypage-évaluation

(12 cognitives, I^2 sensorimotrices). Nous avons déjà mentionné dans les sections précédentes que le temps d'apprentissage et d'adaptation (temps que l'utilisateur mettra pour se faire une représentation mentale de la tâche dans l'EV par rapport à l'ER) pourrait être utilisé pour ces évaluations. Ce temps d'apprentissage peut dans certains cas dépendre de la représentation mentale utilisée. À titre d'exemple, pour un schème naturel, le temps d'apprentissage pourrait être réduit, car l'action réalisée dans l'EV est identique à l'action réalisée dans l'ER. Pour une métaphore, le temps d'apprentissage peut être plus ou moins long en fonction de la complexité de la tâche et le profil des utilisateurs.

Il est possible d'utiliser les méthodes d'évaluation des EIAH existantes. La méthode empirique consiste par exemple à évaluer le comportement de l'utilisateur pendant l'utilisation du prototype en suivant des critères déterminés [Nie94]. L'observation permet d'identifier les capacités de l'utilisateur, de détecter les difficultés éventuelles qui peuvent conduire à une distance technologique, ou encore les caractéristiques inattendues [GWG⁺05]. On peut aussi utiliser une méthode analytique pour évaluer les prototypes en se basant sur des listes de critères conçus par des ergonomes, par exemple l'apprentissage (de l'utilisation du prototype), l'efficacité (facilité à réaliser l'action souhaitée via les interfaces comportementales), la mémorisation (capacité à reprendre en main rapidement le système lors d'utilisations espacées), les erreurs (liées à l'utilisation du logiciel) et la satisfaction subjective de l'utilisateur [Nie94, SP10]. Nous avons choisi d'inclure la satisfaction dans l'évaluation de l'expérience utilisateur, évaluée à la suite de trois sessions d'expérimentation dans un VD-Learning collaboratif conçu dans le cadre de nos

travaux (cf. chapitre 7).

5.4.4.2 Evaluation de l'utilité

L'évaluation de l'utilité nous permet de vérifier que le VD-Learning réalisé est en adéquation avec les fonctions nécessaires aux utilisateurs pour atteindre les objectifs pédagogiques. Il s'agit ici d'évaluer les I^2 fonctionnelles. Rappelons ici que l'évaluation se fait sur deux niveaux : l'apprentissage (de la discipline enseignée et non de la manipulation du système) et la réalisation de la tâche proposée par le système (cette étape correspond à l'évaluation des I^2 fonctionnelles [Jea00]). On n'évalue pas ici un prototype, mais le système en entier. Il existe plusieurs méthodes pour évaluer l'utilité d'un VD-Learning. Les méthodes quantitatives ont pour but de mesurer de manière objective l'impact du système sur l'apprentissage (par exemple les méthodes comparative, microgénétique, ou « on-line »). Les méthodes qualitatives permettent de « quantifier l'impact de l'EIAH sur l'apprentissage (dans une situation contrôlée), les résultats obtenus avec ces méthodes sont souvent difficiles à généraliser à une situation complexe telle que l'apprentissage dans une classe » (recueil de verbalisations, adaptation de méthodes ethnographiques, entretiens, les collectes de documents, etc). Toutes ces méthodes sont détaillées dans les travaux de Nogry et Jean-Daubias [NJDOB04]. D'après ces auteurs, le choix de la méthode peut être guidé par le courant épistémologique choisi (cf. section 3.1). Pour eux, les EIAH sont toujours conçus en référence à un courant épistémologique même si cette référence n'est pas explicite. Nous n'explorons pas les détails du choix de la méthode dans le cadre de nos travaux.

5.4.4.3 Evaluation de l'expérience utilisateur

Bien que l'évaluation de l'expérience utilisateur puisse être intégrée dans les autres niveaux d'évaluation (principalement dans l'utilisabilité), nous choisissons d'isoler ce niveau d'évaluation. Il s'agit ici d'évaluer la qualité de l'expérience vécue et le ressenti des utilisateurs dans le VD-Learning. Cette évaluation, qui à notre avis est subjective, peut couvrir plusieurs variables. Ainsi on peut évaluer l'acceptabilité, l'engagement des apprenants, la motivation des apprenants, la satisfaction, l'affection entre apprenants ou encore le rapprochement des apprenants dans le VD-Learning. Nous étudions en détail cette évaluation dans le chapitre 7 dans le cadre d'une expérimentation.

5.4.5 Schéma de conception avec les interdépendances

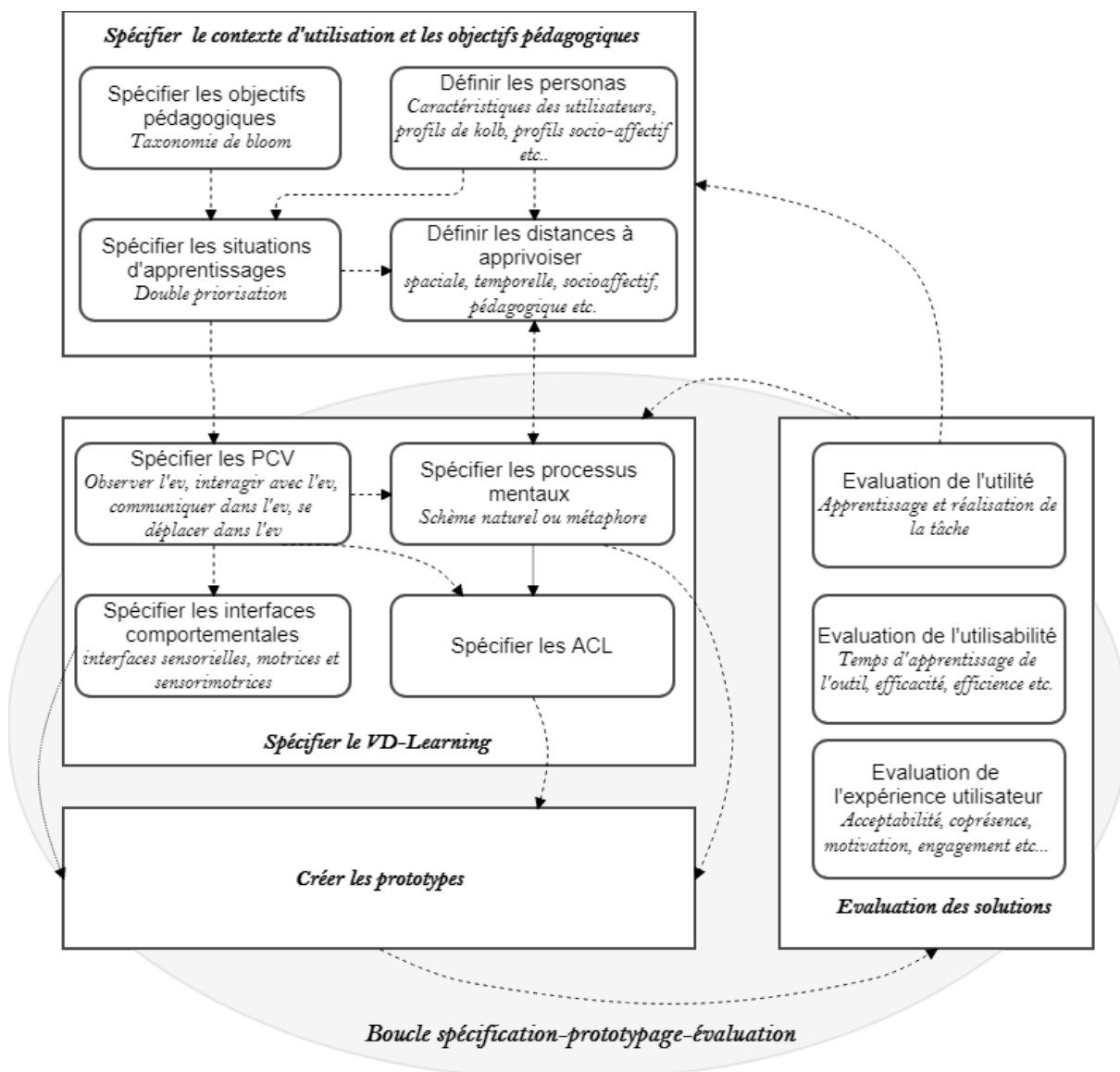


FIGURE 5.9: Schéma de conception avec les interdépendances des étapes

5.5 Outils de réalisation des environnements RV

Pour terminer ce chapitre, nous proposons de faire un tour rapide sur les outils de création des prototypes RV.

Avec la vulgarisation des technologies de RV, plusieurs outils ont été créés pour réaliser des environnements virtuels interactifs, généralement répartis en 4 catégories : les plateformes de développement (ou "frameworks") dédiés à la RV, les moteurs de jeu munis de bibliothèques

fournies par les fabricants de périphériques, les middlewares RV et les outils d'assistance pour les moteurs de jeu. Nous rajoutons une dernière catégorie nommée CMS de RV, et détaillons chacune ci-dessous.

5.5.1 Les plateformes de développement dédiées à la RV

Les premières plateformes existent depuis plus de 30 ans et ont été conçues principalement pour des besoins militaires. Les outils de développement proposés permettaient de programmer l'ensemble d'une scène au moyen d'une seule et même interface et offraient la possibilité de gérer le comportement des objets, les animations et les interactions. Les plus populaires de ces outils sont Virtools et Eon Studio, basés sur une programmation visuelle [YJSZ09] pouvant limiter le champ d'action pour les développeurs de RV souhaitant garder un maximum de liberté. Virtools permet de coder ses propres blocs de programmation réutilisables, et regroupe un ensemble de techniques pour la visualisation et l'interaction 3D temps réel.

Nous pouvons aussi citer Virtual Reality Modeling Language (VRML) qui est un langage de description d'univers RV. Un fichier VRML contient des informations permettant d'afficher les éléments (modèles 3D, lumières, etc.) à l'aide d'un visionneur installé sur un navigateur ou sous forme d'un logiciel autonome. En 2015, une autre plateforme JavaScript open source, nommée A-Frame, a été créée pour la construction d'expériences de réalité virtuelle. Les applications A-Frame sont développées à partir de simples fichiers HTML et accessible directement à partir d'un navigateur web. A-Frame prend en charge la plupart des visiocasques VR existants, et vise à définir des expériences de RV interactives totalement immersives qui vont au-delà du contenu de base à 360°, en utilisant pleinement le suivi de position et les contrôleurs. A-Frame est utilisée par de grandes entreprises qui contribuent dans certains cas au développement de l'outil (Google, Microsoft, Oculus, Samsung, etc).

5.5.2 Moteurs de jeu équipés de bibliothèques VR

Le principe consiste pour les fabricants de dispositifs RV à proposer des kits de développement permettant de prendre en compte ces équipements dans un moteur de jeu, principalement Unity3D et Unreal Engine 5.

Unity3D est un moteur de jeu multiplateforme (Web, Windows, Playstation, mobiles etc.) développé par Unity Technologies qui permet de créer des projets en 3D temps réel pour les secteurs des jeux vidéo, de l'animation, du cinéma, de l'automobile, des transports, de l'architecture, de l'ingénierie, etc [Xie12]. Ces dernières années, Unity3D a ajouté des outils permettant d'intégrer très facilement les interactions en RV, par exemple la sélection des objets,

l'interaction UI, ou la téléportation. Le langage de développement dans Unity3D est le C#. Unreal Engine 5 est un autre moteur de jeu développé par Epic Games et basé sur le langage C++.

A titre d'exemple, les kits de développement Oculus pour Unity et UE5 sont disponibles sur <https://developer.oculus.com/downloads/>.

5.5.3 Middlewares RV

D'après Loup [Lou17], un middleware RV a pour rôle principal d'assurer le transfert de données entre les périphériques et l'application finale. Nous pouvons par exemple citer Flowvr qui est un middleware dédié aux applications de réalité virtuelle distribuées sur des clusters [AGL⁺04]. Flowvr prend en charge le couplage de codes parallèles hétérogènes et est orienté composant pour favoriser la réutilisation du code. D'autres middlewares offrent des interfaces et des bibliothèques de plus haut niveau tel que MiddleVR [KAC⁺14].

5.5.4 Les CMS de réalité virtuelle

Les CMS de réalité virtuelle sont des systèmes préconçus pour des expériences en RV. Le principal avantage de ces systèmes est le fait que leur utilisation ne nécessite aucune compétence en programmation. Ils permettent généralement de réaliser rapidement des applications RV accessible via le navigateur et prennent en charge une multitude de visiocasques. Sans chercher à être exhaustifs, nous présentons dans le tableau ci-dessous une liste de CMS de réalité virtuelle pour la création des ERVC.

CMS	Fonctionnalités	Visiocasques pris en charge	Site web
AltSpaceVR	Personnalisation des avatars, Réunions virtuelles en direct	HTC Vive, Oculus Rift, Oculus Go, Oculus Quest, Samsung Gear VR	altvr.com
Anyland	Création des espaces virtuels personnalisés, Échanges vocaux avec les autres utilisateurs, Utilisation d'avatars créés par la communauté d'utilisateurs	Systèmes d'exploitation Windows	anyland.com
Engage	Création d'évènements, de cours et de réunions collaboratives en direct (prise en charge jusqu'à 70 personnes), Communication vocale, Diffusions en direct et à grande échelle destinées à des millions d'utilisateurs	HTC, Oculus Rift, Oculus Rift S, Oculus Quest, Valve Index, Pico G2, Pico Neo 2	engagevr.io
VRChat	Création de communautés VR, Échanges vocaux avec les autres utilisateurs, Personnalisation des avatars		
Rumii	Création d'avatars personnalisés, Utilisation d'espaces réalistes, Partage d'images, vidéos, objets 3D, etc.	HTC Vive, HTC Vive Pro, Oculus	dogheadsimulations.com/rumii

CMS	Fonctionnalités	Visiocasques pris en charge	Site web
Mozilla Hubs	Création d'espaces virtuels privés, Personnalisation des avatars, Réunions virtuelles en direct, Échange vocaux et textuels entre utilisateurs, Import de contenus multimédias (photos, vidéos, PDF, modèles 3D, etc.)	HTC Vive, HTC Vive Pro, Oculus GO, Oculus Rift et Oculus QUEST et Gear VR, Cardboard, ordinateurs	hubs.mozilla.com
Glue	Création d'espaces virtuels et scénarios personnalisés, Échange vocaux et textuels entre utilisateurs, Utilisation de Post-it, de tableaux blancs et de dessins 3D à main levée, Sauvegarde des documents créés pendant une activité	HTC Vive, HTC Vive Pro, Valve Index, Oculus Rift, Oculus Rift S, Oculus Quest	glue.work
Immersed	Création d'espaces de travail virtuels, Échanges vocaux entre utilisateurs, Création de moniteurs virtuels de l'ordinateur vers la RV (jusqu'à 5 moniteurs), Partage d'écran, Tableau blanc	Oculus Go, Oculus Quest	immersedvr.com
MeetingRoom	Salles de réunions virtuelles, Échanges vocaux entre utilisateurs	HTC Vive, HTC Vive Focus, Oculus, Pico	meetingroom.io

CMS	Fonctionnalités	Visiocasques pris en charge	Site web
Spatial	Voix	Oculus Quest, Holo-Lens	spatial.io
High Fidelity VR	Création d'espaces virtuels sociaux personnalisables, Échanges vocaux et entre utilisateurs		highfidelity.com
Wonda VR	Création de situations d'apprentissage semblables aux situations réelles, Présentations immersives, Interactions multi-utilisateurs en temps réel	HTC Headsets, Oculus Rift, Oculus Go, Oculus Quest, Pico	wondavr.com
vTime	Voix, messages texte	Oculus Rift, Oculus Go, Google Cardboard, Google Daydream, Samsung Gear VR	vtime.net
MeetinVR	Voix	HTC Vive, Oculus Rift, Oculus Rift S, Oculus Quest	meetinvr.com

Chapitre 6

CRÉATION D'UN ENVIRONNEMENT DE RV COLLABORATIF BASÉ SUR LE WEB

Cette partie de la thèse a fait l'objet d'une publication dans la revue IJSRP (International Journal of Scientific and Research Publications) Volume 11, Issue 3, March 2021 Edition. [NICTZ21]. Une version de test de notre application est disponible ici : <https://vdlearning.fr/vrclassroom/5fad94fd0a9bf5fcfe0d8d34>

Un ERVC est un espace 3D qui permet à plusieurs utilisateurs de travailler ensemble sur une tâche commune. Ainsi, en plus des interactions « utilisateur-environnement », des interactions « utilisateur-utilisateur » sont modélisées [Che09]. L'objectif de ce chapitre est de spécifier un VD-Learning collaboratif basé sur le web et destiné à la FAD. Nous nous basons sur les travaux de recherche existants, les systèmes présentés dans le chapitre précédent et notre propre expérience de création d'un VD-Learning pour la FAD. Rappelons que nous utilisons de terme VD-Learning dans le cadre de nos travaux pour désigner les ERV mettant en situation d'apprentissage un ou plusieurs apprenants dans un contexte de FAD.

Dans ce chapitre, nous décrivons premièrement notre méthodologie de travail. Ensuite, nous définissons le contexte d'utilisation du VD-Learning collaboratif. Puis nous spécifions les IHM et les PCV de l'environnement virtuel. Pour chaque PCV, nous détaillons les représentations mentales, les interfaces comportementales et les ALC et formulons quelques recommandations. Nous terminons le chapitre par la présentation du VD-Learning collaboratif développé dans le cadre de nos travaux.

6.1 Méthodologie de travail

Nous avons utilisé notre boucle spécification-prototypage-conception décrite dans le chapitre 5 (cf. figure 5.8) pour spécifier les actions des utilisateurs dans le VD-Learning. Cette approche s'apparente à la méthodologie de recherche orientée par la conception [Col03]. Notons que dans le cadre de nos travaux, nous n'avons pas utilisé cette approche pour les fonctionnalités réalisées en dehors de l'EV, car les utilisateurs sont habitués à l'utilisation de fonctionnalités similaires (elles sont donc anticipables). Nous nous sommes focalisés uniquement sur les représentations mentales et les interfaces comportementales pour chaque action (PCV) des utilisateurs dans l'EV et les ACL (i.e. toutes les actions des utilisateurs difficilement anticipables).

Nous avons tout d'abord spécifié hypothétiquement le VD-Learning en utilisant les résultats d'une enquête réalisée dans le cadre de nos travaux, notre propre expérience dans la conception des environnements virtuels et l'état de l'art des ERVC existants (cf. section 5.5.4). L'enquête portait principalement sur les préférences des utilisateurs dans un dispositif de FAD utilisant

des environnements virtuels. Elle a été soumise à un public de 175 personnes du vendredi 13 au dimanche 22 septembre 2019 (10 jours). Le questionnaire était composé de 11 questions dont 6 à réponse fermée permettant de déterminer le profil du participant, et 5 sous forme de grille basée sur l'échelle de Likert (pas du tout d'accord, pas d'accord, ni d'accord ni en désaccord, d'accord et tout à fait d'accord) permettant de déterminer les préférences des participants.

Ensuite, nous avons produit différents prototypes, chacun d'eux correspondant à une action utilisateur spécifiée à partir de l'état de l'art et de nos propres choix.

Enfin, nous avons réalisé des évaluations des prototypes en condition écologique avec des utilisateurs finaux en situation de formation à distance, dans le but de réviser et d'affiner nos spécifications initiales grâce à une méthode itérative. Pour notre évaluation, nous avons premièrement utilisé une méthode objective, basée sur la quantification du temps d'apprentissage (et d'adaptation) de chaque action proposée au travers des interfaces comportementales permettant de réaliser ces actions. Ensuite, nous avons soumis des questionnaires subjectifs aux apprenants après la mise en situation pour recueillir leurs avis. Les résultats de l'un des questionnaires font l'objet du chapitre 7.

6.2 Contexte d'utilisation du VD-Learning

Les objectifs de notre VD-Learning collaboratif consistent à développer des compétences de coopération entre apprenants dans la réalisation d'une activité d'apprentissage, à favoriser les interactions apprenant-apprenant et apprenant-enseignant, à impliquer les apprenants dans la tâche d'apprentissage, à développer les compétences sociales et à rapprocher les apprenants géographiquement séparés. Notre persona est un apprenant universitaire en formation initiale ou continue, le genre et l'âge ne sont pas pris en compte. Il a l'habitude d'utiliser les outils de l'E-learning et les réseaux sociaux, mais ne connaît pas trop l'univers des jeux vidéo. Il a déjà participé à une formation à distance en utilisant la plateforme Moodle. Sa principale frustration est le fait d'être isolé des autres apprenants dans une formation à distance [Dus14].

Nous nous sommes intéressés aux préférences des apprenants pour ce qui est de la représentation et la configuration de l'environnement virtuel et de la représentation des avatars. Les résultats de notre premier questionnaire ont révélé que les apprenants dans un contexte de FAD ont une préférence pour des environnements se rapprochant au mieux de la réalité (environ 53% contre 34% qui préfèrent des environnements imaginaires). Ces environnements virtuels peuvent être une représentation virtuelle d'une salle de classe (53,14%) ou une représentation

d'un environnement réel autre qu'une salle de classe (52,57%). Les participants ont manifesté un intérêt particulier pour des environnements virtuels évolutifs, qui changent en fonction du temps, du type de SA (77,14%), et des actions des apprenants (82,28%). Pour ce qui est de la représentation des avatars, les apprenants ont une préférence pour les modèles humains (environ 51% d'accord et tout à fait d'accord contre environ 38% qui ont une préférence pour les avatars représentant les personnages imaginaires de type robot). Ces observations ont conduit à intégrer hypothétiquement dans nos personas les préférences des apprenants pour des environnements semblables aux environnements réels, évolutifs et configurables, ainsi que des avatars avec un haut degré d'anthropomorphisme.

Le VD-Learning collaboratif doit fournir différentes fonctionnalités permettant d'accueillir plusieurs situations d'apprentissage. Sans vouloir être exhaustif, en voici quelques-unes à titre d'exemple :

- Un formateur réalise une classe virtuelle ou une conférence virtuelle à distance et en direct avec des apprenants, en partageant des contenus pédagogiques de type PDF, images, modèles 3D, etc. ;
- Les apprenants apprennent à manipuler en groupe (supervisé ou non) un ou plusieurs objets 3D représentant des concepts ;
- Les apprenants se retrouvent dans une salle virtuelle pour réfléchir sur un projet de groupe ;
- Un apprenant passe une soutenance devant un jury.

Enfin, nous avons aussi identifié certaines distances qui devraient être apprivoisées pour garantir l'atteinte des objectifs pédagogiques : la distance spatiale liée à l'éloignement géographique des apprenants, la distance technologie liée à la récence des usages de la RV et la distance socioéconomique liée au coût du matériel.

6.3 Spécification du VD-Learning

6.3.1 Spécification des IHM

Comme nous l'avons suggéré dans la section 5.4.2, les fonctionnalités IHM sont réalisées en dehors du VD-Learning. Elles sont accessibles depuis un navigateur web et sont essentiellement destinées aux formateurs, bien que certaines puissent être utilisés par les apprenants. Nous nous sommes basés principalement sur les ERVC existants (cf. section 5.5.4) et notre savoir-faire en conception des IHM pour isoler les fonctionnalités réalisables en dehors de l'EV. Nous avons ainsi identifié : (1) les fonctionnalités de paramétrage des comptes permettant à tous les

utilisateurs de créer et configurer un compte ; (2) les fonctionnalités de préparation permettant aux formateurs de scénariser une situation d'apprentissage. Cette fonctionnalité intègre le choix de l'EV (parmi les EV existants, ou en important le modèle 3D d'un nouvel environnement), l'import de contenus pédagogiques (PDF, son, illustration, vidéo, animation, modèle 3D, etc.), et le paramétrage de l'interaction des apprenants dans le monde virtuel (par exemple, autoriser les apprenants à manipuler un objet 3D ou une présentation pendant la situation d'apprentissage). Deux exemples d'interface de préparation d'une situation d'apprentissage sont proposés dans les figures 6.1 et 6.2 ; (3) les fonctionnalités d'évaluation permettant aux formateurs d'évaluer une situation d'apprentissage en mesurant par exemple le temps de connexion de chaque apprenant, le temps de prise de parole, etc.

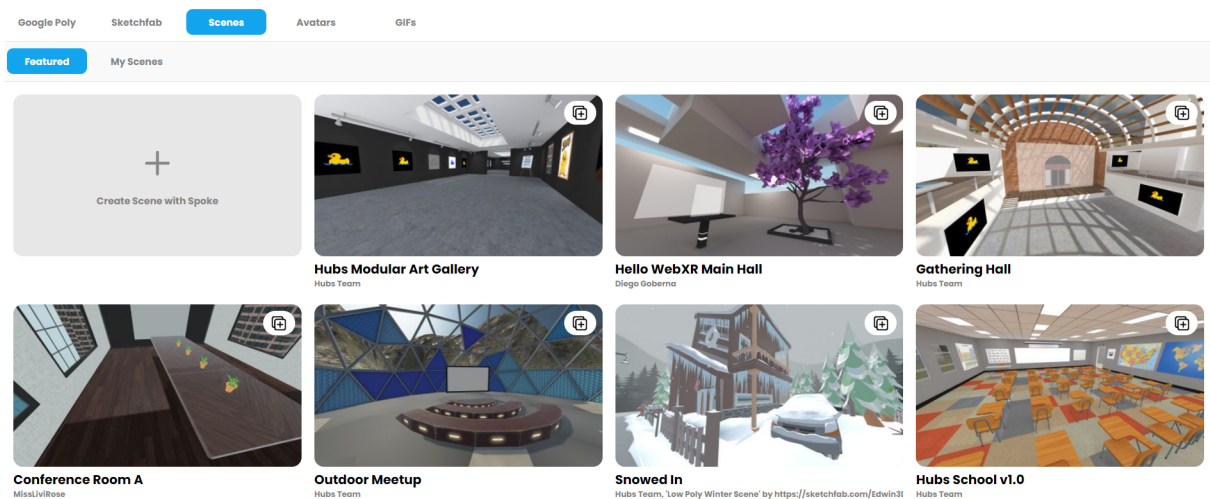


FIGURE 6.1: Interface de préparation d'une situation d'apprentissage sur Mozilla hubs

6.3.2 Spécification de l'ERVC

Tout d'abord, rappelons que nous suivons les courants épistémologiques de type socioconstructivistes voire connectivistes par certains aspects (voir section 3.1). L'apprenant participe à son propre processus d'apprentissage et apprend par les interactions sociales. Ainsi, l'apprenant est défini dans notre VD-Learning collaboratif comme un participant actif (voir 5.4.2). Ainsi, l'application doit permettre aux utilisateurs de réaliser les quatre PCV de base (observer, se déplacer, communiquer avec les autres utilisateurs et interagir dans le monde virtuel). Nous proposons dans cette partie de spécifier les représentations mentales, les ALC et les interfaces comportementales pour chaque PCV.

Observer le monde virtuel

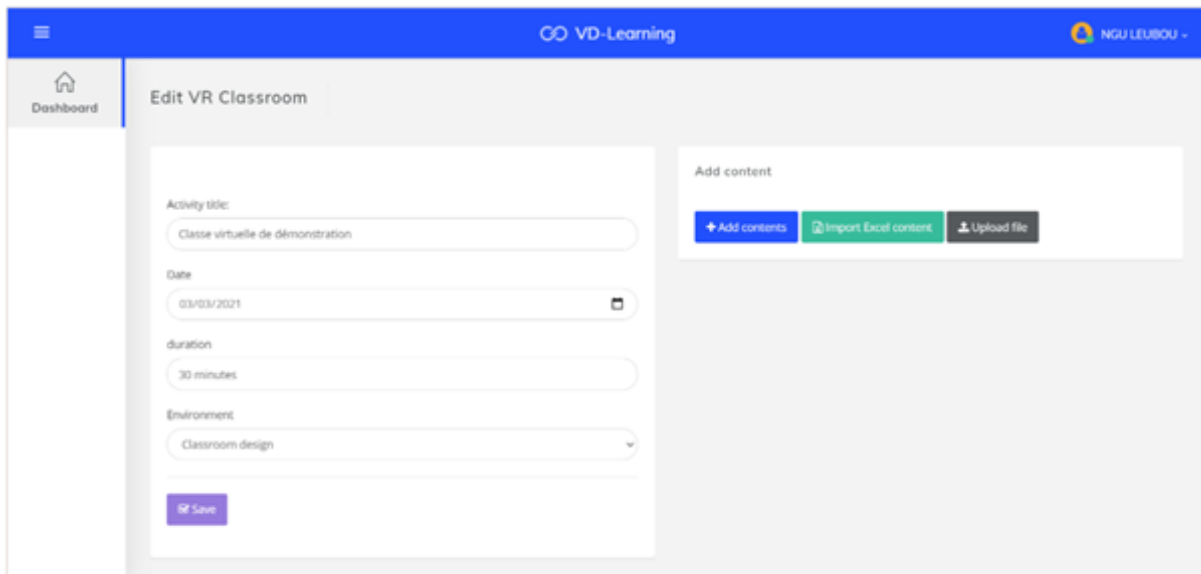


FIGURE 6.2: Interface de préparation d'une situation d'apprentissage sur vdlearning.fr

Pour ce PCV, nous avons proposé un schème naturel d'observation par immersion du regard en 360° dans l'EV via des visiocasques (Oculus Go et HTC Vive), et une métaphore d'observation via un écran d'ordinateur. Notons cependant que la métaphore via un écran d'ordinateur est proposée ici comme une solution alternative pour garantir une large accessibilité. Pour les besoins de nos travaux, nous nous sommes donc limités à l'évaluation du schème naturel utilisant un visiocasque. Étant donné que la plupart des utilisateurs n'avaient jamais utilisé un visiocasque, nous avons envoyé les instructions suivantes par mail avant la première utilisation :

- 1) Créer un compte sur <https://vdlearning.fr/> sur votre ordinateur
- 2) Allumer votre visiocasque
- 3) Lancez le navigateur dans votre visiocasque
- 4) Dans votre navigateur, entrer <https://vdlearning.fr/> (NB : ne pas oublier HTTPS)
- 5) Cliquer sur "se connecter" et entrer votre email et mot de passe pour vous connecter
- 6) Cliquer sur l'activité "EXPERIMENTATION" (vous êtes le groupe 4)
- 7) Autoriser l'accès à votre micro (utilisez des écouteurs)
- 8) Attendre 1 min pour que tous les objets de l'environnement se chargent
- 9) Cliquer sur le bouton VR en bas à droite de votre écran pour entrer en mode VR.

L'évaluation des prototypes nous a permis d'observer que le temps d'apprentissage pour la première utilisation était très réduit (inférieur à 5min). Après cette première expérience, les utilisateurs n'avaient plus besoin d'un rappel des instructions pour utiliser le casque et l'environnement (les séquences d'utilisation étant espacées de 2 à 3 jours chacune). Un nouveau schème d'action, qualifié plus haut de naturel, avait été construit. Nous avons observé que

les utilisateurs ne montraient pas de résistance à l'utilisation du visiocasque, et avaient au contraire l'air enthousiastes. Ceci doit pouvoir s'expliquer par le niveau d'immersion élevé des visiocasques, mais aussi l'effet de nouveauté.

Notons que nous n'avons pas effectué de tests dans un dispositif de type CAVE. De notre point de vue, l'utilisation d'un tel dispositif pourrait créer chez les apprenants une distance socioéconomique (matériel très coûteux), et également technologique (complexité d'installation et de prise en main du dispositif).

Bien que le visiocasque garantisse un niveau d'immersion élevé, qu'il soit adopté sans résistance par les apprenants, et que les conduites opératoires (schèmes naturels) ne posent pas de problème d'appropriation, nous suggérons tout de même de garder la possibilité d'utiliser la métaphore via un écran d'ordinateur uniquement (c'est-à-dire sans casque). Ceci permet de garantir une large accessibilité aux VD-Learning (par exemple pour les utilisateurs ne pouvant acheter un visiocasque). La plateforme Mozilla Hubs propose également ces deux possibilités.

En résumé, pour l'observation de l'EV dans un VD-Learning collaboratif, nous suggérons d'utiliser un schème naturel par immersion du regard en 360° via un visiocasque.

Se déplacer dans le monde virtuel

Pour ce PCV, nous avons premièrement proposé une métaphore de déplacement en contrôle continu. L'utilisateur se déplace en continu en maintenant enfoncée une touche du joystick connecté au visiocasque. Nous avons communiqué aux utilisateurs les instructions pour utiliser cette métaphore pendant leur immersion dans l'EV. Le temps d'apprentissage de la métaphore dans l'EV est évalué à moins de 5min. À la suite de la première évaluation avec les utilisateurs finaux, il a été unanimement remonté une sensation de malaise pendant le déplacement. Ceci peut s'expliquer par l'incohérence sensorimotrice suggérée par Fuchs [Fuc16]. Ainsi, nous avons créé et soumis un second prototype utilisant la métaphore de déplacement par téléportation aux utilisateurs. Pour naviguer dans l'EV, les utilisateurs doivent cibler une position dans l'EV, puis un clic sur le joystick permet de se déplacer à cette position. Comme avec le premier prototype, nous avons communiqué aux utilisateurs les instructions pour utiliser cette métaphore pendant leur immersion dans l'EV. Le temps d'apprentissage était le même que pour le premier prototype, cependant les apprenants ont été très favorables à ce second prototype. De plus, après la première utilisation, les utilisateurs n'avaient plus besoin d'aide pour se déplacer dans l'EV.

En résumé, nous suggérons de représenter le déplacement par la métaphore de téléportation

en utilisant comme interface comportementale un joystick. De notre point de vue, la représentation du déplacement par un schème naturel nécessite l'utilisation d'une interface matérielle très coûteuse (par exemple avec un tapis de marche).

Communiquer avec les autres utilisateurs dans l'environnement virtuel

Nous avons proposé de représenter le PCV de communication dans le monde virtuel par un schème naturel. Ainsi nous avons mis comme interface comportementale le microécouteur intégré au visiocasque et mis en place la spatialisation du son¹. L'évaluation de ce schème en condition écologique nous a permis de constater que les utilisateurs y étaient favorables (même ceux qui n'avaient jamais utilisé un visiocasque). Aucun temps d'apprentissage n'était nécessaire pour ce schème. Ceci peut se justifier par le fait que le but, les sous-buts et les modalités sont les mêmes que dans le monde réel. Les utilisateurs ont néanmoins remonté la difficulté d'identification de celui qui parlait dans l'environnement, étant donné que les avatars n'avaient aucune expression faciale. Pour résoudre ces problèmes, nous proposons l'utilisation de l'une des ALC suivantes :

- La première solution, mise en place dans Mozilla Hubs par exemple, consiste à ajouter une petite animation simple sur l'avatar de la personne qui parle (grossissement de la tête)
- Une icône vocale pour identifier la personne qui parle (cf. figure 6.3)
- Une troisième solution beaucoup plus complexe consiste à rendre les avatars expressifs en ajoutant quelques expressions faciales (avec mouvement de la bouche). Cette solution a été implémentée par Oculus (cf. section 2.1.2.6) et pourrait avoir une influence positive sur la coprésence et le rapprochement des apprenants.



FIGURE 6.3: Aide logicielle comportementale pour la communication dans le VD-Learning

En résumé, nous suggérons de représenter le PCV de communication dans le monde virtuel par le schème naturel avec comme interface comportementale le microécouteur du visiocasque

1. La spatialisation sonore est l'action de créer l'illusion de la localisation d'un son

(ou le micro-écouteur connecté à l'ordinateur dans le cas d'utilisation d'un ordinateur). Il convient d'ajouter un ALC en plus de la spatialisation du son pour permettre aux utilisateurs d'identifier celui qui parle dans l'EV.

Interagir avec un objet dans le monde virtuel

Pour ce PCV, nous avons proposé une métaphore en utilisant une technique de « lancé de rayon » pour la sélection et la manipulation des objets dans l'EV. Les interfaces matérielles utilisées sont le joystick pour le visiocasque, ou les périphériques clavier et souris pour l'ordinateur. Il s'agit par exemple de manipuler une présentation, parcourir un PDF, changer la position d'un objet, etc. Le temps d'apprentissage de cette métaphore était très réduit, car elle est similaire à plusieurs actions dans le monde réel (par exemple, l'utilisation d'une télécommande pour piloter une présentation). On pourrait même envisager le fait que ce soit un schème naturel, la seule limite étant la mise en place de tâches plus complexes, comme par exemple la manipulation d'un cœur humain virtuel pour des travaux pratiques en médecine. Il convient de noter que nous n'avons pas testé la technique d'extension de bras ou encore l'utilisation d'une interface comme le gant de données à cause de la difficulté technique de réalisation et des contraintes économiques.

En résumé, nous suggérons de représenter l'interaction par la métaphore de « lancé de rayon » en utilisant comme interface comportementale un joystick. Bien que l'utilisation d'un gant de donnée puisse être envisagée comme interface comportementale, il est important de prendre en compte les contraintes qui pourraient créer des distances technologiques et socio-économiques.

Le tableau suivant résume les quatre PVC spécifiés, les représentations mentales et les interfaces utilisées pour chaque PCV. Nous utilisons **S** pour désigner « **schème naturel** » et **M** pour désigner « **métaphore** ».

PCV	Observation		Communication		Manipulation		Déplacement	
	S	M	S	M	S	M	S	M
Processus mental	S	M	S	M	S	M	S	M
Ecran d'ordinateur		X						
Visiocasque RV	X							
Casque audio branché sur l'ordinateur			X					
Micro-écouteur intégré au visiocasque			X					
Périphériques d'entrée ordinateur (souris/clavier)						X		X
Joystick						X		X

6.3.3 Les autres recommandations pour un VD-Learning collaboratif

Pour terminer cette section, nous allons formuler quelques recommandations supplémentaires issues de notre expérience, de l'évaluation des utilisateurs finaux, et des recommandations techniques.

Durée d'une situation d'apprentissage dans un VD-Learning collaboratif

D'après l'évaluation de 22 utilisateurs, la durée idéale d'une SA dans l'environnement virtuel se situe entre 15 et 30min. Cette affirmation représente 90,9% des réponses (cf. figure 6.4) d'un sondage soumis aux apprenants suite à trois séquences d'utilisation du VD-Learning collaboratif.



FIGURE 6.4: Sondage sur la durée d'une situation d'apprentissage dans un VD-Learning

Choix du visiocasque

Le choix du visiocasque doit prendre en compte les caractéristiques techniques telles que les interfaces comportementales utiles pour la réalisation des PCV, le confort et la santé de l'utilisateur, la qualité de l'immersion, etc. Cependant, dans un contexte de formation à distance, il est aussi nécessaire de prendre en compte les questions économiques afin d'éviter la distance socio-économique et la facilité d'utilisation pour éviter la distance technologique. Pour nos expérimentations, nous avons testé les casques Oculus Go et HTC Vive. D'un point de vue technique, les deux casques répondent au besoin mais le HTC Vive est plus complexe à installer (ce qui pourrait éventuellement créer une distance technologique). D'un point de vue économique, le coût du visiocasque Oculus Go est plus abordable que celui de HTC Vive. Nous avons envisagé la recommandation d'Oculus Go, mais étant donné l'arrêt du support de ce visiocasque en décembre 2020 nous recommandons l'utilisation du modèle Oculus Quest qui, en plus de reprendre tous les avantages d'Oculus Go, utilise des contrôleurs avec 6 degrés de

liberté (gauche-droite, haut-bas et avant-arrière) alors qu'Oculus Go n'en proposait que 3.

Choix de l'architecture et des outils techniques pour la création des prototypes

Plusieurs outils de réalisation des ERV ont été proposés dans la section 5.5.4. Pour choisir une architecture ou un outil de création d'un VD-Learning collaboratif, il faut prendre en compte, en plus de la difficulté de la conception des interactions, la connexion multi-utilisateurs, la synchronisation de l'état du système en temps réel pour tous les utilisateurs (i.e. lorsqu'un utilisateur change les propriétés d'un objet dans l'EV, ce changement doit être perçu en temps réel pour tous les utilisateurs présents dans l'EV), la cohérence du système pour tous les utilisateurs, la communication en temps réel entre utilisateurs, et l'état de la connexion internet. Ainsi, pour un VD-Learning collaboratif basé sur le web, nous suggérons l'utilisation de la technologie WebRTC (Web Real-Time Communication) déjà éprouvée aujourd'hui dans les plateformes de visioconférence et faisant l'objet de plusieurs travaux de recherche. WebRTC est une technologie futuriste qui rend possible une communication en temps réel dans la transmission audio, vidéo et de données via des navigateurs Web sans nécessité d'installer un plug-in particulier [NAH18]. WebRTC se base sur l'architecture client-serveur avec le concept de communication peer-to-peer entre les navigateurs. Pour résoudre les problèmes liés à WebRTC que rencontrent généralement les utilisateurs sur appareil mobile ou connectés derrière un pare-feu, nous recommandons d'utiliser un serveur TURN pour établir la connexion initiale entre les utilisateurs dans une salle virtuelle. Une fois la connexion établie, aucune autre action n'est nécessaire (cf. figure 6.5).

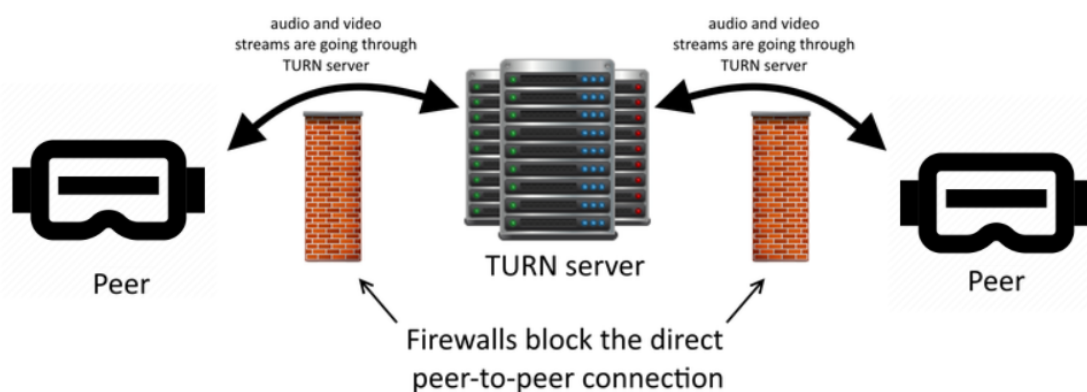


FIGURE 6.5: WebRTC avec un server TURN

En résumé, la création d'un VD-Learning collaboratif requiert des compétences en développement informatique et réseau. Nous suggérons donc, principalement pour les non-développeurs, d'utiliser des solutions CMS comme Mozilla Hubs ou la plateforme <https://vdlearning.fr> développée dans le cadre de nos travaux.

6.4 Description du VD-Learning collaboratif créé dans le cadre de nos travaux

Dans cette dernière section, nous proposons de présenter la plateforme vdlearning.fr développée dans le cadre de nos travaux. Pour rappel, une version démo de l'EV est disponible à l'adresse <https://vdlearning.fr/vrclassroom/5fad94fd0a9bf5fcfe0d8d34>.

Sur le plan fonctionnel, notre plateforme est un VD-Learning collaboratif basé sur le web et proposant différentes fonctionnalités. Tout d'abord, une interface IHM permet aux utilisateurs de s'inscrire et de se connecter sur la plateforme, de créer des classes et d'y inscrire des apprenants, de créer des situations d'apprentissage collaboratives dans les classes et de configurer les avatars ainsi que la représentation de l'EV. Trois types d'avatars sont proposés : les avatars représentés sous forme d'objets sphériques avec des couleurs générées de manière aléatoire, les avatars représentés sous forme de personnages imaginaires de type robot, et les avatars générés à partir de la photo des apprenants. L'environnement virtuel, accessible directement via le navigateur et compatible avec les casques Oculus Go, Oculus Rift, HTC Vive ou Google Daydream, offre la possibilité aux utilisateurs de réaliser les quatre PCV de base : l'observation du monde virtuel se fait par immersion du regard dans l'EV avec une vue à la première personne ; les utilisateurs peuvent se déplacer dans l'EV par téléportation ; la communication vocale avec d'autres utilisateurs dans l'EV est possible et intègre la spatialisation du son ; enfin les interactions, par exemple avec le tableau virtuel, utilisent la technique de « lancé de rayon ».

Sur le plan technique, notre plateforme est basée sur une architecture 3-tiers (trois niveaux) :

- **Le tier de l'interface utilisateur** : ce premier niveau correspond à la couche de présentation, i.e. la partie visible et interactive de l'application pour les utilisateurs. Elle fournit une entrée conviviale pour communiquer avec le système à l'aide d'un navigateur web, et contient les composants HTML nécessaires pour collecter et afficher les informations reçues de la part du tier des données décrit ci-dessous. La communication avec le serveur web s'effectue via un protocole HTTP. Contrairement aux applications web standard, la principale contrainte dans notre cas est de permettre aux utilisateurs d'être immergés dans un environnement virtuel avec la possibilité d'interactions 3D. Nous avons utilisé le langage HTML5 avec le Framework JavaScript A-Frame permettant la création d'expériences RV.
- **Le tier de la logique applicative** : ce deuxième niveau représente la couche de traitement et correspond à la partie fonctionnelle de l'application qui met en œuvre la logique métier et décrit les opérations sur les données en fonction des demandes des

utilisateurs, obtenues à partir de la couche précédente. Dans notre cas, toute la logique utilisateur et la gestion des rôles, l'authentification, la gestion des classes et la gestion des activités sont implémentées à ce niveau. Notre serveur web est implémenté avec Node.js afin d'assurer de bonnes performances lors du traitement simultané de grands volumes de requêtes.

- **Le tier des données** : cette couche correspond au système de base de données, qui doit être capable d'envoyer et de stocker les données manipulées dans la couche de logique applicative. Notre application utilise MongoDB pour sa simplicité, sa flexibilité et son évolutivité.

Chapitre 7

EXPERIMENTATION DE LA COPRESENCE DANS UN VD-LEARNING COLLABORATIF

Dans ce chapitre, nous analysons l'impact de la RV sur l'expérience utilisateur des apprenants. Plus précisément, nous étudions l'impact de la représentation des avatars sur le sentiment de coprésence et le rapprochement des apprenants.

Nous présentons premièrement la méthode utilisée pour l'évaluation de la coprésence ainsi que les variables évaluées dans notre étude. Ensuite nous détaillons les conditions écologiques de l'expérimentation réalisée. Enfin nous présentons les résultats, l'analyse et les conclusions de cette étude.

7.1 Méthodologie de recherche

Deux types de méthodes sont généralement utilisées pour mesurer le sentiment de présence dans un ERV : les méthodes subjectives et les méthodes objectives. [Bou09]. Les méthodes subjectives sont, pour la plupart, basées sur un principe d'évaluation par questionnaire. Il existe des questionnaires de mesure de la présence physique [WS98b, SFR01] et des questionnaires de mesure de la présence sociale et de la coprésence [BRBL01, NB03]. Les méthodes objectives sont quant à elles basées sur l'évaluation des réponses physiologiques et comportementales [Bou09].

Selon Riva *et al.* [Bou09], différents critères permettent de s'assurer de la validité de la méthode utilisée. Il s'agit de la fiabilité (la mesure doit être stable et cohérente au cours du temps) ; la validité (l'expérimentation mesure le facteur escompté) ; la sensibilité (la mesure doit pouvoir distinguer les niveaux de présence) ; la robustesse (la méthode employée pour la mesure doit pouvoir être transposée à différents systèmes de réalité virtuelle et différents contenus et contextes) ; la non-intrusivité (la méthode utilisée ne doit pas perturber le déroulement de l'expérience) ; la commodité (la méthode doit être simple à comprendre, à mettre en place et à administrer).

Pour vérifier nos hypothèses, nous avons utilisé la méthodologie basée sur des évaluations subjectives par questionnaire en adaptant le questionnaire de Nowak (cf. Table 7.1) traitant de la coprésence en EV [NB03]. Le questionnaire complet de Nowak est présenté en annexe de ce document.

Ce questionnaire permet d'évaluer la présence perçue de l'autre et la coprésence perçue par soi-même. Pour les besoins de notre étude, nous avons extrait et traduit 9 questions en les contextualisant dans le domaine de la FAD (le terme *partenaire d'interaction* a par exemple été remplacé par *autres apprenants*). La coprésence est ainsi évaluée à partir de 6 variables

dépendantes :

- l'implication dans l'activité (i)
- la sensation (chaleur/froideur) perçue entre apprenants (ii) ;
- l'échange des informations personnelles (iii) ;
- le sentiment de proximité entre apprenants (iv) ;
- les communications vocales ou verbales entre apprenants (v) ;
- la motivation à réaliser une activité en groupe (vi).

Chaque affirmation est évaluée sur une échelle de Likert (pas du tout d'accord, pas d'accord, ni d'accord ni en désaccord, d'accord, tout à fait d'accord). La suite de cette section donne plus de détails sur l'environnement et l'activité proposée avant de soumettre le questionnaire aux apprenants.

TABLE 7.1: Adaptation du questionnaire subjectif de Nowak

Coprésence perçue par les autres participants		
Code	Variable	Items
COO1	(i)	Les autres apprenants ont été fortement impliqués dans l'activité.
COO2	(ii)	Les autres apprenants ont communiqué la froideur plutôt que la chaleur.
COO3	(iii)	Les autres apprenants n'étaient pas disposés à partager des informations personnelles avec moi.
COO4	(iv)	Les autres apprenants ont créé un sentiment de proximité entre nous.
COO5	(v)	Les autres apprenants étaient intéressés à me parler.
Coprésence perçue par soi-même		
COO8	(iii)	Je n'étais pas disposé à partager des informations personnelles avec les autres apprenants.
COO9	(iv)	J'ai essayé de créer un sentiment de proximité entre nous.
COO10	(v)	Je souhaitais parler aux autres apprenants.
COO11	(vi)	L'activité d'apprentissage avec les autres apprenants m'a particulièrement motivé.

7.2 Description de l'expérimentation

7.2.1 Caractéristiques de l'environnement d'expérimentation

Le public de notre expérience était composé d'un échantillon de 22 apprenants tous inscrits en formation à distance dans des cursus proposés par les universités de Strasbourg et de Limoges.

L'expérimentation se déroule dans une salle virtuelle (cf. figure 7.1). L'un des murs de la salle contient un tableau destiné à la projection de contenus (images, fichiers PDF, etc). Les utilisateurs connectés peuvent se déplacer dans l'EV par téléportation. La communication se fait à l'aide d'un chat vocal utilisant le son spatialisé (i.e. permettant aux apprenants de localiser l'origine des sons dans la salle).

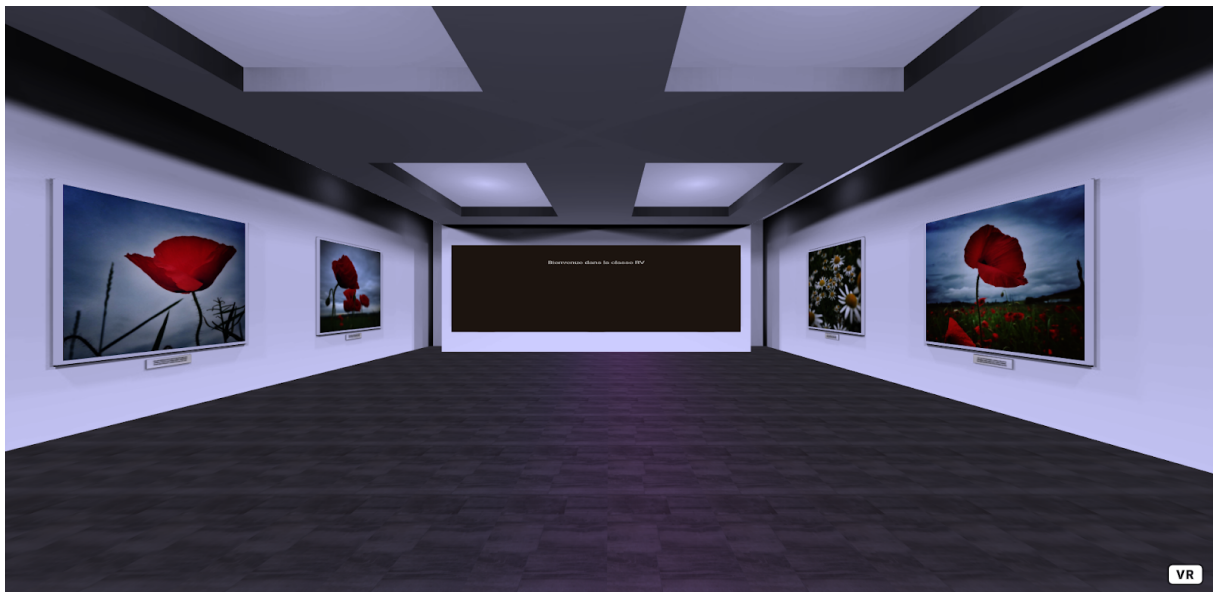


FIGURE 7.1: Salle de classe virtuelle

7.2.2 Description de la situation d'apprentissage

Le domaine d'application de l'activité groupale proposée aux apprenants est l'entrepreneuriat. L'objectif final est de trouver une idée innovante pour la création d'une entreprise. L'expérience se décompose en une série de 3 séquences de 20 min en moyenne. Chaque séquence est caractérisée par l'utilisation d'une forme différente d'avatar : soit un avatar avec un faible degré d'anthropomorphisme représenté sous forme d'une sphère (cf. figure 7.2), soit un personnage imaginaire représenté sous la forme d'un robot (cf. figure 7.3), soit un avatar avec un haut degré d'anthropomorphisme (cf. figure 7.4) car modélisé à partir de la photo de l'apprenant. Chaque forme d'avatar est complétée par le prénom des apprenants. Comme nous l'avons défini dans les chapitres précédents, le degré d'anthropomorphisme représente le degré de ressemblance à une forme humaine.

7.2.3 Déroulement de l'expérimentation

L'activité est réalisée en groupes de 4 ou 5 participants. La première séquence rassemble les participants d'un même groupe ainsi qu'un tuteur dans la salle de RV. Pendant cette séquence,



FIGURE 7.2: Apprenants dans la salle virtuelle représentés sur forme de sphère



FIGURE 7.3: Apprenants dans la salle virtuelle représentés sur forme de personnage imaginaire (type robot)

le tuteur se présente et montre un diaporama contenant les instructions sur l'activité à réaliser en groupe. Dans la deuxième séquence, les apprenants se retrouvent dans l'environnement virtuel pour réaliser l'activité. Le scénario consiste en un tour de table où chacun se présente. Ensuite le groupe réalise une forme de brainstorming pour recueillir les idées, puis choisit l'idée qui sera présentée sur un document partagé. La dernière séquence se réalise avec le groupe en présence du tuteur. Chaque groupe désigne un rapporteur qui présente les membres du groupe et l'idée innovante retenue.



FIGURE 7.4: Apprenants dans la salle virtuelle représentés avec une forme humaine

Les 3 séquences sont réalisées sur une période de 2 semaines. A la fin de la série, notre questionnaire est soumis aux participants pour évaluer la coprésence en fonction des différentes variables.

7.3 Résultats et analyses

Pour analyser les résultats, nous nous sommes basés sur une méthode quantitative en réalisant un tri à plat et un tri croisé. Pour le tri croisé, il s'agissait de croiser la variable « représentation des avatars » en fonction des différents facteurs de coprésence. Nous avons ainsi utilisé le test du χ^2 et du V de Cramer pour déterminer la dépendance entre les variables.

Dans nos tableaux de résultats ci-après, les valeurs représentées en bleu sont celle dont l'effectif réel (données expérimentales) est nettement supérieur à l'effectif théorique. Par conséquent, ces modalités particulières sont précisément celles qui contribuent le plus à la dépendance de la relation. Les valeurs en rose sont celle dont l'effectif réel est nettement inférieur à l'effectif théorique ; elles contribuent le moins à la dépendance de la relation.

7.3.1 Évaluation de l'implication des apprenants dans la réalisation d'activités groupales

CO01 : Les autres apprenants ont été fortement impliqués dans l'activité.

Un premier tri à plat nous permet d’observer que les apprenants semblent impliqués (engagés) dans la réalisation des activités groupales avec leurs pairs dans le VD-Learning collaboratif. Cette observation se rapporte à 59,1% (soit 45,5% “d’accord” et 13,6 % “tout à fait d’accord”) pour l’utilisation d’un avatar ayant la forme d’une sphère, 86,3% (soit 63,6% “d’accord” et 22,7% “tout à fait d’accord”) pour l’utilisation d’un avatar ayant la forme d’un robot et 95,5% (soit 36,4% “d’accord” et 59,1% “tout à fait d’accord”) pour l’utilisation d’un avatar ayant une forme humaine.

Si nous croisons maintenant la variable avatar avec la variable (i) portant sur l’implication des apprenants dans une activité groupale réalisée dans un VD-Learning collaboratif, nous obtenons les résultats suivants :

COO1	Pas d'accord	Ni d'accord ni en désaccord	D'accord	Tout à fait d'accord	TOTAL
AVATAR					
AVATAR SPHERE	4,6%	36,4%	45,5%	13,6%	100%
AVATAR ROBOT	0,0%	13,6%	63,6%	22,7%	100%
AVATAR HUMAIN	0,0%	4,6%	36,4%	59,1%	100%
TOTAL	1,5%	18,2%	48,5%	31,8%	100%

Dans ce tableau croisé, nous remarquons d’abord que la forme des avatars semble avoir une influence non négligeable sur le degré d’implication d’un apprenant à travailler avec d’autres apprenants dans une activité groupale.

Un test de χ^2 permet de le vérifier. En effet, avec un ddl de 6, on obtient un χ^2 calculé de 18,25 supérieur au χ^2 théorique à 1-p=99,44%. Par ailleurs, le V de Cramer est égal à 37,18%. On en déduit que les différences observées entre nos valeurs expérimentales et nos valeurs théoriques ne sont pas dues au hasard, autrement dit que la dépendance entre la forme des avatars et l’implication des apprenants à travailler ensemble dans un VD-Learning collaboratif est avérée et très significative.

Au vu de ces résultats, nous pouvons conclure que un VD-Learning collaboratif en contexte de contexte de FAD, les apprenants semblent impliqués dans la réalisation d’activités groupales. Le niveau d’implication varie très significativement en fonction de la représentation des

avatars, avec un niveau d'implication plus élevé pour les avatars présentant un haut degré d'anthropomorphisme. Nous pouvons donc valider l'hypothèse 1 de départ.

7.3.2 Évaluation du degré de chaleur ressenti dans la communication entre apprenants

COO2 : Les autres apprenants ont communiqué la froideur plutôt que la chaleur.

Un premier tri à plat (similaire au COO1) nous permet d'observer que les apprenants semblent communiquer chaleureusement entre eux dans le VD-Learning collaboratif.

Si nous croisons la variable avatar avec la variable (ii) portant sur la chaleur ressentie pendant la communication entre apprenants dans le VD-Learning collaboratif, nous obtenons les résultats suivants :

COO2	Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Ni d'accord ni en désaccord	D'accord	Tout à fait d'accord	TOTAL
AVATAR						
AVATAR SPHERE	18,2%	40,9%	27,3%	13,6%	0,0%	100%
AVATAR ROBOT	22,7%	45,5%	13,6%	4,6%	13,6%	100%
AVATAR HUMAIN	68,2%	22,7%	4,6%	0,0%	4,6%	100%
TOTAL	36,4%	36,4%	15,2%	6,1%	6,1%	100%

Pour la variable COO02, avec un ddl de 8, on obtient un χ^2 calculé de 21,80 à 1-p=99,47%. De plus, le pourcentage de variance expliquée (V de Cramer) est égal à 40,64%. La dépendance est **très significative**.

Au vu de ces résultats, nous pouvons conclure que dans un VD-Learning collaboratif les apprenants semblent communiquer de manière chaleureuse. Le degré de chaleur ressenti dans la communication interpersonnelle semble varier en fonction de la représentation des avatars, avec un degré plus élevé pour les avatars présentant un haut degré d'anthropomorphisme. Ce résultat peut se justifier par l'effet d'immersion dans l'environnement virtuel conduisant d'une part au sentiment d'être avec les autres, et d'autre part au sentiment de réconfort provoqué par le réalisme des avatars (visages connus et reconnus). L'hypothèse 2 est donc validée.

7.3.3 Évaluation du niveau de disposition à partager les informations personnelles

Nous avons utilisé deux variables pour évaluer le niveau disposition des apprenants à partager les informations personnelles dans le VD-Learning collaboratif : l'intérêt des autres à partager les informations personnelles à soi et le souhait de soi à partager les informations personnelles aux autres.

COO3 : Les autres apprenants n'étaient pas disposés à partager des informations personnelles avec moi.

COO8 : Je n'étais pas disposé à partager des informations personnelles avec les autres apprenants.

Un premier tri à plat (similaire au COO1) nous permet d'observer que les apprenants ne semblent pas disposés à partager les informations personnelles dans le VD-Learning collaboratif, quel que soit le sens de la relation (soi envers les autres et les autres envers soi).

Si nous croisons maintenant la variable avatar avec les variables (iii) portant sur la disposition des apprenants à partager les informations personnelles dans le VD-Learning collaboratif, nous obtenons les résultats suivants :

	COO3	D'accord	Ni d'accord ni en désaccord	Pas d'accord	Pas du tout d'accord	Tout à fait d'accord	TOTAL
AVATAR							
AVATAR HUMAIN		31,8%	9,1%	9,1%	4,6%	45,5%	100%
AVATAR ROBOT		45,5%	18,2%	4,6%	4,6%	27,3%	100%
AVATAR SPHERE		45,5%	27,3%	9,1%	0,0%	18,2%	100%
TOTAL		40,9%	18,2%	7,6%	3,0%	30,3%	100%

COO8	Pas d'accord	Ni d'accord ni en désaccord	D'accord	Tout à fait d'accord	TOTAL
AVATAR					
AVATAR SPHERE	4,6%	18,2%	54,6%	22,7%	100%
AVATAR ROBOT	9,1%	13,6%	59,1%	18,2%	100%
AVATAR HUMAIN	4,6%	13,6%	36,4%	45,5%	100%
TOTAL	6,1%	15,2%	50,0%	28,8%	100%

Pour la variable COO03, avec un ddl de **8**, on obtient un χ^2 calculé de **6,87** à **1-p=44,89%**. De plus, le pourcentage de variance expliquée (V de Cramer) est égal à **22,81%**. La dépendance n'est **pas significative**.

Pour la variable COO08, avec un ddl de **6**, on obtient un χ^2 calculé de **5,24** à **1-p=48,61%**. De plus le pourcentage de variance expliquée (V de Cramer) est égal à **19,92%**. La dépendance n'est **pas significative**.

Au vu de ces résultats, nous pouvons conclure que les apprenants ne semblent pas très disposés à partager des informations personnelles dans un environnement de [?] conçu pour la formation à distance, quel que soit le type d'avatar. Ce résultat peut se justifier par le fait que notre expérience n'a duré que 60 minutes au total. De fait, les apprenants n'ont pas eu le temps de s'y sentir à l'aise et de faire confiance à leurs pairs. Ce constat mériterait néanmoins d'être à nouveau testé sur une période plus longue. Notre hypothèse 3 n'est donc pas validée.

7.3.4 Évaluation du sentiment de proximité entre apprenants

Nous avons utilisé deux variables pour évaluer le sentiment de proximité : le sentiment de proximité de soi par rapport aux autres apprenants (COO04) et le sentiment de proximité des autres apprenants par rapport à soi (COO09).

COO4 : Les autres apprenants ont créé un sentiment de proximité entre nous.

COO9 : J'ai essayé de créer un sentiment de proximité entre nous.

Un premier tri à plat (similaire à COO1) nous permet d'observer que les apprenants semblent créer un sentiment de proximité des autres apprenants (dans les deux sens) dans le VD-Learning

collaboratif.

Si nous croisons maintenant la variable avatar avec les variables (iv) portant sur le sentiment de proximité entre des apprenants dans le VD-Learning collaboratif, nous obtenons les résultats suivants :

CO04	Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Ni d'accord ni en désaccord	D'accord	Tout à fait d'accord	TOTAL
AVATAR						
AVATAR SPHERE	0,0%	13,6%	22,7%	27,3%	36,4%	100%
AVATAR ROBOT	0,0%	9,1%	13,6%	45,5%	31,8%	100%
AVATAR HUMAIN	4,6%	0,0%	0,0%	27,3%	68,2%	100%
TOTAL	1,5%	7,6%	12,1%	33,3%	45,5%	100%

CO09	Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Ni d'accord ni en désaccord	D'accord	Tout à fait d'accord	TOTAL
AVATAR						
AVATAR SPHERE	0,0%	13,6%	22,7%	54,6%	9,1%	100%
AVATAR ROBOT	4,6%	18,2%	4,6%	59,1%	13,6%	100%
AVATAR HUMAIN	0,0%	4,6%	0,0%	54,6%	40,9%	100%
TOTAL	1,5%	12,1%	9,1%	56,1%	21,2%	100%

Pour la variable CO04, avec un ddl de 8, on obtient un χ^2 calculé de 14,81 à 1-p=93,69%. De plus, le pourcentage de variance expliquée (V de Cramer) est égal à 33,49%. La dépendance est donc **peu significative**.

Pour la variable CO09, avec un ddl de 8, on obtient un χ^2 calculé de 16,95 à 1-p=96,93%. De plus le pourcentage de variance expliquée (V de Cramer) est égal à 35,83%. La dépendance est **significative**.

Au vu de ces résultats, nous pouvons conclure qu'étant éloignés physiquement les uns des autres dans un contexte de FAD (distance spatiale), les apprenants cherchent dans cet

environnement expérimental à recréer un sentiment de proximité mis à mal par la distance physique (i.e. à réduire la distance perçue entre eux). Ce sentiment de proximité est perçu différemment selon le sens des relations interpersonnelles considérées : de soi par rapport aux autres apprenants, ou bien des autres par rapport à soi. La perception de la proximité de soi par rapport aux autres semble varier en fonction de la représentation des avatars, avec un sentiment plus élevé pour les avatars représentant un haut degré d'anthropomorphisme. En revanche, la perception de la proximité des autres par rapport à soi semble moins varier en fonction de l'avatar. Une explication à cette différence semble être le fait que dans l'environnement RV, les apprenants ne voient pas leur propre avatar, mais ceux des autres. Les avatars utilisés n'étant pas expressifs (mouvement de la bouche, expression du regard, etc.), il devient plus difficile de percevoir le sentiment des autres. Notre hypothèse 4 est donc partiellement validée.

7.3.5 Evaluation des échanges vocaux entre apprenants

Nous avons utilisé deux variables pour évaluer le souhait des apprenants à parler entre eux dans le VD-Learning collaboratif : l'intérêt des autres à parler à soi (COO05) et le souhait de soi à parler aux autres (COO09).

COO5 : Les autres apprenants étaient intéressés à me parler.

COO10 : Je souhaitais parler aux autres apprenants.

Un premier tri à plat (similaire à COO1) nous permet d'observer respectivement pour COO05 et COO10 que les apprenants souhaitent communiquer avec d'autres apprenants dans le VD-Learning collaboratif.

Si nous croisons maintenant la variable avatar avec les variables (v) portant sur l'intérêt des apprenants à communiquer vocalement (dans les deux sens) dans le VD-Learning collaboratif, nous obtenons les résultats suivants :

COO5	Pas d'accord	Ni d'accord ni en désaccord	d'accord	Tout à fait D'accord	TOTAL
AVATAR					
AVATAR SPHERE	9,1%	22,7%	45,5%	22,7%	100%
AVATAR ROBOT	9,1%	9,1%	50,0%	31,8%	100%
AVATAR HUMAIN	9,1%	0,0%	27,3%	63,6%	100%
TOTAL	9,1%	10,6%	40,9%	39,4%	100%

COO10	Pas d'accord	Ni d'accord ni en désaccord	D'accord	Tout à fait d'accord	TOTAL
AVATAR					
AVATAR SPHERE	4,6%	18,2%	63,6%	13,6%	100%
AVATAR ROBOT	9,1%	13,6%	63,6%	13,6%	100%
AVATAR HUMAIN	0,0%	4,6%	45,5%	50,0%	100%
TOTAL	4,6%	12,1%	57,6%	25,8%	100%

Pour la variable COO05, avec un ddl de **6**, on obtient un χ^2 calculé de **12,14** à **1-p=94,10%**. De plus, le pourcentage de variance expliquée (V de Cramer) est égal à **30,32%**. La dépendance est donc **peu significative**.

Pour la variable COO10, avec un ddl de **6**, on obtient un χ^2 calculé de **12,12** à **1-p=94,07%**. De plus le pourcentage de variance expliquée (V de Cramer) est égal à **30,30%**. La dépendance est donc **peu significative**.

Au vu de ces résultats, nous pouvons conclure que les échanges vocaux semblent susciter un très grand intérêt chez les apprenants immergés dans l'environnement de RV. Ce résultat reste vrai dans les deux sens indiqués précédemment (l'intérêt de soi à parler aux autres et l'intérêt des autres à parler à soi), quel que soit le type d'avatar. Cet intérêt pourrait se justifier par la difficulté à effectuer des échanges textuels dans un VD-Learning collaboratif. Notre hypothèse 5 de départ est donc partiellement validée.

7.3.6 Evaluation de la motivation à réaliser des activités groupales avec d'autres apprenants

COO11 : L'activité d'apprentissage avec les autres apprenants m'a particulièrement motivé.

Un premier tri à plat (similaire à COO1) nous permet d'observer que les apprenants semblent motivés à réaliser des activités groupales avec leurs pairs dans le VD-Learning collaboratif.

Si nous croisons maintenant la variable avatar avec la variable (iv) portant sur la motivation des apprenants à travailler ensemble dans l'environnement virtuel, nous obtenons les résultats suivants.

COO11	D'accord	Ni d'accord ni en désaccord	Pas d'accord	Pas du tout d'accord	Tout à fait d'accord	TOTAL
AVATAR						
AVATAR SPHERE	50,0%	27,3%	0,0%	0,0%	22,7%	100%
AVATAR ROBOT	59,1%	4,6%	9,1%	4,6%	22,7%	100%
AVATAR HUMAIN	31,8%	4,6%	0,0%	0,0%	63,6%	100%
TOTAL	47,0%	12,1%	3,0%	1,5%	36,4%	100%

Pour la variable COO011, avec un ddl de **8**, on obtient un χ^2 calculé de **20,91** à **1-p=99,23%**. De plus le pourcentage de variance expliquée (V de Cramer) est égal à **39,70%**. La dépendance est **très significative**.

Au vu de ces résultats, nous pouvons conclure que réaliser une activité groupale avec ses pairs semble provoquer chez les apprenants une réelle motivation. Ce sentiment augmente en fonction de la forme de l'avatar utilisé, et en particulier pour les avatars présentant un haut degré d'anthropomorphisme. Notre hypothèse 6 est donc validée.

7.3.7 Tableau récapitulatif des résultats

TABLE 7.2: Résultat du tri croisé pour l'ensemble des variables

Variable	Question	$\tilde{\chi}^2$	ddl	1-p	V de Cramer	Dépendance
i	COO1	18,25	6	99,44%	37,18	Très significative
ii	COO2	21,80	8	99,47%	40,64	Très significative
iii	COO3	6,87	8	44,89%	22,81	Pas significative
	COO8	5,24	6	48,61%	19,92	Pas significative
iv	COO4	14,81	8	93,69%	33,49	Peu significative
	COO9	16,95	8	96,93%	35,83	Significative
v	COO5	12,14	6	94,10%	30,32	Peu significative
	COO10	12,12	6	94,07%	30,30	Peu significative
vi	COO11	20,91	8	99,23%	39,70	Très significative

7.4 Conclusion

Les résultats précédents nous permettent de conclure ce chapitre en observant que la réalité virtuelle semble contribuer de façon significative au sentiment de coprésence des apprenants, ainsi qu'au rapprochement des apprenants dans un contexte de FAD. Certains facteurs de cette coprésence sont influencés par la représentation des avatars dans l'environnement virtuel, avec une contribution élevée pour les avatars représentés avec un haut degré d'anthropomorphisme. Il s'agit de l'implication des apprenants dans la réalisation d'une activité groupale, de la motivation à réaliser une activité avec d'autres apprenants, et des relations chaleureuses ressenties dans les échanges.

Chapitre 8

CONCLUSION

Dans cette thèse, nous avons analysé comment la réalité virtuelle pourrait impacter la formation à distance.

Dans un premier temps, nous avons formalisé une approche de conception des environnements de réalité virtuelle pour la formation à distance. Notre approche est basée sur le modèle général à trois dimensions de la réalité virtuelle (l'immersion et l'interaction sensorimotrices, cognitives et fonctionnelles). Elle prend en compte les spécificités de la distance et intègre les utilisateurs finaux dans le processus de conception. Partant du constat que l'on ne peut pas totalement anticiper la façon dont l'utilisateur perçoit, comprend et utilise la réalité virtuelle, ni anticiper son comportement dans un environnement de réalité virtuelle, nous avons adopté une démarche itérative en proposant la boucle spécification-prototypage-évaluation. Cette approche, qui s'apparente à la recherche orientée par la conception, consiste à spécifier une action utilisateur, créer le prototype correspondant et de soumettre ce prototype aux utilisateurs finaux pour l'évaluation. Chaque itération prend donc en compte les retours d'évaluation des utilisateurs finaux pour affiner et améliorer la spécification de départ. Notre approche se décline en quatre étapes. La première est la spécification du contexte d'utilisation et des objectifs pédagogiques, qui consiste à spécifier les objectifs pédagogiques, définir les profils des utilisateurs (apprenants et enseignants), définir les situations d'apprentissage et déterminer les distances à apprivoiser. La seconde étape est la spécification de l'environnement virtuel, c'est-à-dire les interfaces homme-machine (correspondant aux actions réalisées en dehors de l'environnement virtuel) et les primitives comportementales virtuelles (correspondant aux actions réalisées dans l'environnement virtuel). Pour chaque primitive comportementale virtuelle, on spécifie les représentations mentales (schèmes naturels ou métaphores), les interfaces comportementales et les aides logicielles comportementales virtuelles. La troisième étape consiste à concevoir les prototypes de l'environnement virtuel, et enfin la dernière étape vise à évaluer l'environnement de réalité virtuelle. L'évaluation est réalisée en trois étapes : évaluation de l'utilité, de l'utilisabilité, et de l'expérience utilisateur.

Dans un second temps, nous avons utilisé notre boucle spécification-prototypage-évaluation pour définir les spécifications d'un environnement de réalité virtuelle collaboratif pour la formation à distance. Ainsi, sur la base d'un questionnaire soumis aux utilisateurs finaux, de notre expérience dans la conception des environnements virtuels et de la connaissance des environnements existants, nous avons spécifié les fonctionnalités des interfaces homme-machine et les actions utilisateurs (primitives comportementales virtuelles) dans l'environnement. Partant de l'hypothèse que les apprenants participent au processus d'apprentissage et apprennent par les interactions sociales (socioconstructivisme et behaviorisme), nous avons défini les apprenants comme participants actifs dans l'environnement virtuel. Ainsi, nous avons spécifié quatre

actions de base : (1) l'observation du monde virtuel représenté mentalement par un schème naturel et utilisant comme interface comportementale un visiocasque ; (2) le déplacement dans le monde virtuel représenté mentalement par une métaphore (la téléportation) et utilisant comme interface comportementale le joystick du visiocasque ; (3) la communication dans le monde virtuel représenté mentalement par un schème naturel et utilisant comme interface comportementale le micro-écouteur du visiocasque ; (4) l'interaction avec les objets dans le monde virtuel représentée mentalement par une métaphore (lancé de rayon) et utilisant comme interface comportementale le joystick du visiocasque. Nous avons pris en compte le temps d'apprentissage, les contraintes de distance technologique, les contraintes de distance socioéconomique et les retours des utilisateurs pour le choix de ces solutions. Du point de vue technique, pour la création des environnements de réalité virtuelle collaboratifs, nous avons proposé sur la base des systèmes existants d'utiliser la technologie WebRTC basée sur une architecture peer-to-peer pour faire face aux défis de connexion multiutilisateur, de synchronisation de l'état du système en temps réel pour tous les utilisateurs et de communication en temps réel entre utilisateurs. Ainsi, nous avons recommandé pour les non-développeurs d'utiliser une solution CMS comme Mozilla Hubs ou notre propre plateforme vdlearning.fr, qui ne nécessitent aucune compétence technique et intègrent déjà la technologie WebRTC.

Enfin, l'expérimentation réalisée dans un environnement de réalité virtuelle collaboratif, avec des apprenants inscrits dans une formation à distance, nous a permis de montrer que la réalité virtuelle contribue à améliorer l'expérience des utilisateurs à travers la coprésence dans l'environnement virtuel. Nous avons pu constater que certains facteurs de la coprésence liés à l'expérience utilisateur sont favorablement influencés par la réalité virtuelle. Il s'agit de l'implication des apprenants dans la réalisation d'une activité groupale, la motivation à réaliser une activité avec d'autres apprenants, ou les relations chaleureuses ressenties dans les échanges. Ces trois premiers facteurs sont fortement influencés par la représentation des avatars dans l'environnement virtuel, avec une influence plus marquée pour les avatars qui possèdent un haut degré d'anthropomorphisme (représentés sous forme humaine). Par ailleurs, bien que peu ou pas influencés par la représentation des avatars, les facteurs tels que le sentiment de proximité entre apprenants et les communications verbales semblent avoir contribué au sentiment de coprésence dans l'environnement. Enfin, notre étude montre que les apprenants sont peu disposés à partager des informations personnelles dans l'environnement, quelle que soit la forme d'avatar. Il est important de noter que notre expérience a été réalisée sur un échantillon relativement faible (22 personnes). Les résultats obtenus mériteraient donc d'être confortés par une expérimentation portant sur un public plus large. Néanmoins, ils montrent qu'un environnement de réalité virtuelle pour la formation à distance, conçu autour des préférences et des besoins des apprenants et utilisant des avatars représentés par

une forme humaine, concourt de façon positive au bien-être et à la motivation de ces apprenants.

Comme perspective à nos travaux, nous suggérons de réaliser les mêmes expérimentations en ajoutant des expressions faciales aux différents avatars. Selon Fabri et More [FM05], l'introduction de l'expressivité émotionnelle peut faciliter la communication interpersonnelle dans des environnements virtuels collaboratifs. Le visage de l'avatar, principal moyen d'interaction, devrait pouvoir afficher les six expressions faciales "universelles" de l'émotion : bonheur, surprise, colère, peur, tristesse et dégoût [EOF91]. D'un point de vue technique, cette solution semble complexe à mettre en place mais nous espérons que les innovations futures faciliteront son implémentation. Les travaux récents de la société Oculus sur les avatars expressifs vont dans ce sens. Les yeux de ces avatars se comportent de façon réaliste avec des micro-saccades, et capables de suivre des objets. De plus, les dernières versions intègrent une synchronisation labiale utilisant l'intelligence artificielle pour rendre le mouvement des lèvres plus réaliste et les nuances d'expression du visage plus subtiles. Le système Oculus intègre aussi la personnalisation de la couleur des yeux, des lèvres, des cils, des sourcils, des coupes de cheveux, des vêtements et des lunettes. Bien que ces avatars ne soient disponibles que pour les utilisateurs d'Oculus à ce jour, le système pourra être généralisé dans l'avenir. Pour Facebook, le prochain défi à relever consiste à offrir une représentation du corps entier des avatars. Cela pourrait d'après eux offrir « *un sentiment de présence sociale beaucoup plus riche et plus complet* ».

D'un point de vue personnel, nous pensons que la réalité virtuelle est une technologie puissante qui permet d'améliorer la formation à distance. Cependant, elle ne devrait pas être utilisée pour remplacer systématiquement les outils et pratiques pédagogiques existants mais pour seulement les compléter lorsque cela apporte une plus-value. Elle pourrait par exemple servir à renforcer le lien socioaffectif entre apprenants géographiquement séparés, favoriser les interactions et stimuler la motivation. Il est important également de noter que la généralisation de la réalité virtuelle dans la formation à distance devra faire face à quelques difficultés. Du point de vue de l'apprenant, il faudra prendre en compte les questions socio-économiques liées au coût du dispositif. En effet, bien que certaines entreprises comme Google proposent des visiocasques à bas prix tels que Google Cardboard, les interfaces matérielles de ces dispositifs sont limitées aussi bien au niveau de l'immersion que de l'interaction. Ensuite, il faudra prendre en compte les difficultés techniques liées à l'installation et l'utilisation de certains visiocasques. A titre d'exemple, les casques Oculus Rift et HTC vive sont assez complexes à installer et nécessitent une assistance technique pour les utilisateurs novices. Du point de vue du corps enseignant, il faudra s'attendre à une résistance au changement. En effet, d'après Bibeau [Bib07] les enseignants ne veulent en général pas être perturbés par les changements induits par des réformes éducatives et préfèrent conserver leurs habitudes de pratique, ce qui limite

Chapitre 8 – CONCLUSION

l'intégration de nouvelles approches pédagogiques ou des technologies de l'information et de la communication dans l'enseignement. Différentes pistes peuvent être envisagées pour réduire ce problème, par exemple la vulgarisation scientifique de la réalité virtuelle dans un contexte de formation à distance, l'intégration du corps enseignant dans le processus de conception, et la formation des enseignants à l'utilisation de cette technologie.

Bibliographie

- [AB13] Manuela Aparicio and Fernando Bação. E-learning concept trends. 07 2013.
- [ABME07] Margarita Anastassova, Jean-Marie Burkhardt, Christine Mégard, and P Ehanno. L'ergonomie de la réalité augmentée pour l'apprentissage : une revue. *Le Travail Humain*, 70 :97–126, 01 2007.
- [ACB12] Carlos Andujar, Antoni Chica, and Pere Brunet. User-interface design for the ripoll monastery exhibition at the national art museum of catalonia. *Computers & Graphics*, 36(1) :28–37, 2012.
- [ACB17] Mario Alaguero, David Checa, and Andres Bustillo. Measuring the impact of low-cost short-term virtual reality on the user experience. In Lucio Tommaso De Paolis, Patrick Bourdot, and Antonio Mongelli, editors, *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics*, pages 320–336, Cham, 2017. Springer International Publishing.
- [Acq16] François Acquatella. Le cooc, un autre visage du mooc. *Distances et médiations des savoirs. Distance and Mediation of Knowledge*, (14), 2016.
- [Ada06] Paul Adams. Exploring social constructivism : Theories and practicalities. *Education*, 34(3) :243–257, 2006.
- [AETAA12] Mustafa Abidi, A.M. El Tamimi, and Abdulrahman Al Ahmari. Virtual reality : Next generation tool for distance education. *International Journal of Advanced Science and Engineering Technology*, 2 :95–100, 12 2012.
- [AGL⁺04] Jérémie Allard, Valérie Gouranton, Loïc Lecointre, Sébastien Limet, Emmanuel Melin, Bruno Raffin, and Sophie Robert. Flowvr : a middleware for large scale virtual reality applications. *Lecture Notes in Computer Science* 3149, pages 497–505. Springer, 2004.
- [ALF17] Asmaa Alrazzah, Foaud Lamy, and Lamia Fattouh. Environments and system types of virtual reality technology in stem : A survey. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 8, 06 2017.
- [ALGA01] Terry Anderson, Rourke Liam, D Randy Garrison, and Walter Archer. Assessing teaching presence in a computer conferencing context. 2001.
- [Ama14] Amandine Turquier. L'histoire de la réalité virtuelle, March 2014.
- [APB⁺00] M Alcañiz, Concepción Perpiñá, R Baños, José Antonio Lozano, Javier Montesa, Cristina Botella, A Garcia Palacios, H Villa, and J Alozano. A new realistic 3d body representation in virtual environments for the treatment of disturbed body image in eating disorders. *CyberPsychology & Behavior*, 3(3) :433–439, 2000.
- [B⁺56] Benjamin S Bloom et al. Taxonomy of educational objectives. vol. 1 : Cognitive domain. *New York : McKay*, 20 :24, 1956.
- [Baz05] Florence Bazzaro. Référentiels spatiaux des tâches d'interaction et caractéristiques de l'utilisateur influençant la performance en réalité virtuelle. 12 2005.

- [BBC⁺17] Jessy Barre, Azzeddine Benabbou, Valentin Corneloup, Yannick Bourrier, and Anais Job. Simulation et Réalité Virtuelle pour l'apprentissage des Compétences Non-Techniques en conduite et en médecine des situations d'urgence. In *Journées J-RV (journées de l'AFRV)*, Rennes, France, October 2017.
- [BC03] Grigore Burdea and Philippe Coiffet. Virtual reality technology. *Presence*, 12 :663–664, 12 2003.
- [Bea19] Brian J Beatty. Hybrid-flexible course design. *Implementing studentdirected hybrid classes*. Provo, Utah : EdTech Books, 2019.
- [BF95] J. Bell and H. S. Fogler. Investigation and application of virtual reality as an educational tool. 1995.
- [BGD14] Louise Bélanger, Johanne Goudreau, and Francine Ducharme. Une approche éducative socioconstructiviste et humaniste pour la formation continue des infirmières soignant des personnes ayant des besoins complexes. *Recherche en soins infirmiers*, (3) :17–25, 2014.
- [BH99] Doug Bowman and Larry Hodges. An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments. *Symposium on Interactive 3D Graphics*, 182, 09 1999.
- [Bib07] R Bibeau. La «recette» pour l'intégration des tic en éducation. *Montréal, février*, 2007.
- [Bio97] Frank Biocca. The cyborg's dilemma : Progressive embodiment in virtual environments. *Journal of computer-mediated communication*, 3(2) :JCMC324, 1997.
- [BKH97] D. A. Bowman, D. Koller, and L. F. Hodges. Travel in immersive virtual environments : an evaluation of viewpoint motion control techniques. In *Proceedings of IEEE 1997 Annual International Symposium on Virtual Reality*, pages 45–52, 1997.
- [BKT⁺15] Ozlem Baydas, Turkan Karakus, F Burcu Topu, Rabia Yilmaz, Mehmet Ertuğrul Ozturk, and Yuksel Goktas. Retention and flow under guided and unguided learning experience in 3d virtual worlds. *Computers in Human Behavior*, 44 :96–102, 2015.
- [BLD⁺99] Kerstin Boschian, Anette Larsson, Roy Davies, Ulf Minör, and Gerd Johansson. How can people with disabilities navigate in virtual reality with an input device they can use? pages 1111–1115, 01 1999.
- [Bou09] Patrice Bouvier. *La présence en réalité virtuelle, une approche centrée utilisateur*. PhD thesis, Université Paris-Est, 2009.
- [BRBL01] J. Bailenson, Christopher Rex, A. Beall, and J. Loomis. Equilibrium theory revisited : Mutual gaze and personal space in virtual environments. *Presence : Teleoperators Virtual Environments*, 10 :583–598, 2001.
- [BRCD18] Eliane Balaa, Mathieu Raynal, Florent Cabric, and Emmanuel Dubois. Dicho-toZoom : Technique de sélection d'objets dans un environnement virtuel 3D affiché sur Smartphone. In AFIHM, editor, *30eme conférence francophone sur l'interaction homme-machine*, Articles Scientifiques, page 11p, Brest, France, October 2018.

- [Bru96] Jerome Bruner. *The culture of education*. Harvard University Press, 1996.
- [BST]
- [Bur03] Jean-Marie Burkhardt. Immersion, réalisme et présence dans la conception et l'évaluation des environnements virtuels. 2003.
- [CAT12] Carolina Costa, Helena Alvelos, and Leonor Teixeira. The use of moodle e-learning platform : a study in a portuguese university. *Procedia Technology*, 5 :334–343, 2012.
- [CB10] Marcello Carrozzino and Massimo Bergamasco. Beyond virtual museums : Experiencing immersive virtual reality in real museums. *Journal of Cultural Heritage*, 11(4) :452–458, 2010.
- [CB12] M. Cisel and M. Bruillard. Chronique des mooc. *Revue Sticef*, vol. 19, p.1-16, 2012.
- [Cha03] Daniel Chartier. Les styles d'apprentissage : entre flou conceptuel et intérêt pratique. *Savoirs*, (2) :7–28, 2003.
- [Che07] Jenova Chen. Flow in games (and everything else). *Commun. ACM*, 50(4) :31–34, April 2007.
- [Che09] Amine Chellali. A study on human-human interactions for common frame of reference development within collaborative virtual environments. 12 2009.
- [CLT18] Hwei Teeng Chong, Chen Kim Lim, and Kian Lam Tan. Challenges in virtual reality system : A review. In *AIP Conference Proceedings*, volume 2016, page 020037. AIP Publishing LLC, 2018.
- [CM92] Thomas Caudell and David Mizell. Augmented reality : An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. volume 2, pages 659 – 669 vol.2, 02 1992.
- [Col03] Design-Based Research Collective. Design-based research : An emerging paradigm for educational inquiry. *Educational researcher*, 32(1) :5–8, 2003.
- [Cos12] Laurent Cosnefroy. Autonomie et formation à distance. *Recherche formation*, 69 :111–118, 03 2012.
- [Csi90] Mihaly Csikszentmihalyi. *Flow : The Psychology of Optimal Experience*. 01 1990.
- [CZJ16] Xue-qin Chang, Dao-hua Zhang, and Xin-xin Jin. Application of virtual reality technology in distance learning. *International Journal of Emerging Technologies in Learning*, 11(11), 2016.
- [Des06] Gireg Desmeulles. *Réification des interactions pour l'expérience in virtuo de systèmes biologiques multi-modèles*. Theses, Université de Bretagne occidentale - Brest, December 2006.
- [Dev] Développer un cours en formation hybride | enseigner à l'université laval. <https://www.enseigner.ulaval.ca/ressources-pedagogiques/developper-un-cours-en-formation-hybride>. (Accessed on 03/14/2021).
- [Dew38] John Dewey. Logic : the theory of inquiry. new york : Henry holt and company. B. Thayer-Bacon (2003), *Relational "(e) pistemologies."* New York : Peter Lang Publishing, 1938.

- [DIE13] WILLIAM C DIEHL. Charles a. wedemeyer visionary pioneer of distance education. *Handbook of distance education*, page 38, 2013.
- [DKK17] Christian Depover, Thierry Karsenti, and Vassilis Komis. *Pour comprendre les MOOCs : nature, enjeux et perspectives*. PUQ, 2017.
- [DM81] W. Doise and G. Mugny. *Le développement social de l'intelligence*. 1981.
- [DMM08] Kosmas Dimitropoulos, Athanasios Manitsaris, and Ioannis Mavridis. Building virtual reality environments for distance education on the web : A case study in medical education. *International Journal of Social Sciences*, 2, 01 2008.
- [Doo99] Peter E Doolittle. *Constructivism and online education*, 1999.
- [Dus14] Clement Dussarps. *Dimension socio-affective et abandon en formation ouverte et à distance*. Theses, Université Michel de Montaigne - Bordeaux III, November 2014.
- [EII91] S.R. Ellis. Nature and origins of virtual environments : a bibliographical essay. *Computing Systems in Engineering*, 2(4) :321 – 347, 1991.
- [EOF91] Paul Ekman, Maureen OSullivan, and Wallace Friesen. *Face, voice, and body in detecting deceit*. 1991.
- [FD20] Nadine Forget-Dubois. *Définitions et modalités de la formation à distance*. 2020.
- [FM05] Marc Fabri and David Moore. *The use of emotionally expressive avatars in collaborative virtual environments*. 04 2005.
- [FMA06] Philippe Fuchs, Guillaume Moreau, and Bruno Arnaldi. *Le traité de la réalité virtuelle Volume 4 - Les applications de la réalité virtuelle*. Mathématique et informatique. Presse des Mines, March 2006.
- [FMB06] Philippe Fuchs, Guillaume Moreau, and Alain Berthoz. *Le traité de la réalité virtuelle volume 1 : L'Homme et l'environnement virtuel*. Mathématique et informatique. Presse des Mines, March 2006. (troisième édition entièrement revue et complétée en 5 volumes).
- [FMHR87] S. S. Fisher, M. McGreevy, J. Humphries, and W. Robinett. *Virtual environment display system*. I3D '86, page 77–87, New York, NY, USA, 1987. Association for Computing Machinery.
- [fS19] International Organization for Standardization. *ISO 9241-210 :2019 Ergonomics of human-system interaction — Part 210 : Human-centred design for interactive systems*. International Organization for Standardization, 2019.
- [Fuc16] Philippe Fuchs. *Les casques de réalité virtuelle et de jeux vidéo*. Presses des Mines-Transvalor, 2016.
- [Fuc18] Philippe Fuchs. *Théorie de la réalité virtuelle : les véritables usages*. Collection Mathématiques et informatique. Mines Paristech PSL, Paris, 2018.
- [GA13] D Randy Garrison and Zehra Akyol. The community of inquiry theoretical framework. *Handbook of distance education*, 3 :104–120, 2013.
- [GAA01] D Randy Garrison, Terry Anderson, and Walter Archer. Critical thinking, cognitive presence, and computer conferencing in distance education. *American Journal of distance education*, 15(1) :7–23, 2001.

- [Gat09] Jean-Pierre Gaté. Apprenant. *J.-P. Boutinet, L'ABC de la VAE*, pages 77–78, 2009.
- [GB90] Thomas L Good and Jere E Brophy. *Educational psychology : A realistic approach*. Longman/Addison Wesley Longman, 1990.
- [GCAR17] Geoffrey Gorisse, Olivier Christmann, Etienne Armand Amato, and Simon Richir. First- and third-person perspectives in immersive virtual environments : Presence and performance analysis of embodied users. *Frontiers in Robotics and AI*, 4 :33, 2017.
- [GFCB+20] Mar Gonzalez Franco, Brian Cohn, Dalila Burin, Eyal Ofek, and Antonella Maselli. The self-avatar follower effect in virtual reality. In *IEEE VR 2020*, March 2020.
- [GFDSK+20] Joakim Grant Frederiksen, Stine Maya Dreier Sørensen, Lars Konge, Morten Svendsen, Morten Nobel-Jørgensen, Flemming Bjerrum, and Steven Andersen. Cognitive load and performance in immersive virtual reality versus conventional virtual reality simulation training of laparoscopic surgery : a randomized trial. *Surgical Endoscopy*, 34 :1–9, 03 2020.
- [GP19] Julien Gobeil-Proulx. La perspective étudiante sur la formation comodale, ou hybride flexible. *Revue internationale des technologies en pédagogie universitaire/International Journal of Technologies in Higher Education*, 16(1) :56–67, 2019.
- [Gui10] François Guité. Le connectivisme (néo socioconstructivisme), Feb 2010.
- [GWG+05] Robert M Gagne, Walter W Wager, Katharine C Golas, John M Keller, and James D Russell. *Principles of instructional design*, 2005.
- [Hac03] Martin Hachet. *Interaction avec des environnements virtuels affichés au moyen d'interfaces de visualisation collective*. PhD thesis, Bordeaux 1, 2003.
- [Han20] Aziz Hantem. Les conditions de l'enseignement à distance pendant le confinement dû au COVID19 : Cas de l'enseignement supérieur au Maroc. June 2020. working paper or preprint.
- [Hee92] Carrie Heeter. Being there : The subjective experience of presence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 1, 1992.
- [Hei60] Morton L. Heilig. *Stereoscopic-television apparatus for individual use*. 1960.
- [Hei62] Morton L. Heilig. *Sensorama simulator*. Number 3050870. August 1962.
- [HN20] A. Harfouche and Farid Nakhle. Creating bioethics distance learning through virtual reality. *Trends in Biotechnology*, 38 :1187 – 1192, 2020.
- [HRL10] Hsiu-Mei Huang, Ulrich Rauch, and Shu-Sheng Liaw. Investigating learners' attitudes toward virtual reality learning environments : Based on a constructivist approach. *Computers & Education*, 55(3) :1171–1182, 2010.
- [HWGLA18] Dongbiao He, Cédric Westphal, and JJ Garcia-Luna-Aceves. Network support for ar/vr and immersive video application : A survey. 2018.
- [Jac93] G. Jacquinot. Apprivoiser la distance et supprimer l'absence ? ou les défis de la formation à distance. *Revue Francaise De Psychanalyse*, 102 :55–67, 1993.
- [Jea00] Stéphanie Jean. Application de recommandations ergonomiques : spécificités des eiao dédiés à l'évaluation. 2000.

- [Jon08] David H Jonassen. Instructional design as design problem solving : An iterative process. *Educational Technology*, pages 21–26, 2008.
- [KAC⁺14] Sebastian Koenig, Aitor Ardanza, Camilo Cortes, Alessandro De Mauro, and Belinda Lange. Introduction to low-cost motion-tracking for virtual rehabilitation. In *Emerging therapies in neurorehabilitation*, pages 287–303. Springer, 2014.
- [Kal93] Roy Kalawsky. *The Science of Virtual Reality and Virtual Environments*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., USA, 1st edition, 1993.
- [Kar13] Thierry Karsenti. Mooc : Révolution ou simple effet de mode?/the mooc : Revolution or just a fad? *Revue internationale des technologies en pédagogie universitaire/International Journal of Technologies in Higher Education*, 10(2) :6–37, 2013.
- [Ker09] Jennifer Kerzil. Constructivisme. *Éducation - Formation*, 2009.
- [KHPS20] Griffin Kao, Jessica Hong, Michael Perusse, and Weizhen Sheng. *The Rise and Fall of Virtual Reality : What It Takes to Create Technological Disruption*, pages 133–139. 02 2020.
- [KPV19] Eric Krokos, Catherine Plaisant, and Amitabh Varshney. Virtual memory palaces : immersion aids recall. *Virtual Reality*, 23(1) :1–15, 2019.
- [Krä00] Bernd J Krämer. Forming a federated virtual university through course broker middleware. In *Proceedings : LearnTec*, 2000.
- [KSW⁺19] Dorota Kaminska, Tomasz Sapinski, Slawomir Wiak, Toomas Tikk, Rain Haamer, Egils Avots, Ahmed Helmi, Cagri Ozcinar, and Gholamreza Anbarjafari. Virtual reality and its applications in education : Survey. *Information (Switzerland)*, 10 :318, 10 2019.
- [Kwi04] Vincent F Kwisnek. Assessing the effectiveness of e-learning. In *Instructional Technologies : Cognitive Aspects of Online Programs*, pages 192–220. IGI Global, 2004.
- [L'A16] CONSEIL SUPERIEUR DE L'AUDIOVISUEL. *Etat des lieux du marché de la réalité virtuelle*. CSA, 2016.
- [Laf01] Pierre Laforcade. Etude et conception des mécanismes d'agents détecteurs, évaluateurs et qualificateurs des erreurs d'un apprenant dans un eiah. *Diplôme d'études approfondies, IUT de Bayonne*, 2001.
- [LD97] Matthew Lombard and Theresa Ditton. At the Heart of It All : The Concept of Presence. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2), 09 1997. JCMC321.
- [Lee04] Kwan Lee. Presence, explicated. *Communication Theory*, 14 :27 – 50, 2004.
- [Leg92] GA Legault. L'expérience éthique à la lumière des théories développementalistes. *Réseaux-Ciephum*, (64-65-66) :99–111, 1992.
- [LEJR⁺16] Emilie Loup-Escande, Éric Jamet, Martin Ragot, Séverine Erhel, Nicolas Michinov, Clément Peltier, and Thomas Lopez. Concevoir des environnements virtuels éducatifs avec les utilisateurs finaux : Exemple du projet virtualiteach. *Revue Terminal - Technologie de l'information, culture et société*, 06 2016.

- [LFKD01] Jane Lessiter, Jonathan Freeman, Edmund Keogh, and Jules Davidoff. A cross-media presence questionnaire : The itc-sense of presence inventory. *Presence*, 10 :282–297, 06 2001.
- [LM09] Richard Lemay and Martine Mottet. Les méthodes pédagogiques utilisées pour construire un environnement d'apprentissage socioconstructiviste dans un cours en ligne en mode hybride. *Revue internationale des technologies en pédagogie universitaire/International Journal of Technologies in Higher Education*, 6(2-3) :47–55, 2009.
- [Lou01] Domitile Lourdeaux. *Réalité virtuelle et formation : conception d'environnements virtuels pédagogiques*. Theses, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, October 2001.
- [Lou17] Guillaume Loup. *Conception et développement d'interactions immersives pour jeux sérieux*. PhD thesis, Université du Maine, 2017.
- [MAG⁺12] Fabio Marton, Marco Agus, Enrico Gobetti, Giovanni Pintore, and Marcos Balsa Rodriguez. Natural exploration of 3d massive models on large-scale light field displays using the fox proximal navigation technique. *Computers & Graphics*, 36(8) :893–903, 2012.
- [Mar11] Pascal Marquet. e-learning et conflit instrumental. entre didactique, pédagogie et technique. *Recherche et formation*, (68) :31–46, 2011.
- [Mar14] Jacques Marc. *Le recours aux formations à distance (e.learning) dans la formation professionnelle des salariés : Présentation, influence sur les acteurs et éléments de vigilance*. 11 2014.
- [MD96] Jean-Claude Marot and Anne Darnige. *La téléformation*. Presses universitaires de France, 1996.
- [MFH⁺17] Kapil Chalil Madathil, Kristin Frady, Rebecca Hartley, Jeffrey Bertrand, Myrte de Alfred, and Anand Gramopadhye. An empirical study investigating the effectiveness of integrating virtual reality-based case studies into an online asynchronous learning environment. 2017.
- [MG99] Tomasz Mazuryk and Michael Gervautz. Virtual reality - history, applications, technology and future. 12 1999.
- [Mic19] D Brazley Michael. Virtual reality and distance education. *Glob J Eng Sci*, 1(5), 2019.
- [MIN80] MARVIN MINSKY. Telepresence. *OMNI magazine*, 1980.
- [Min15] Saloni Minocha. The state of virtual reality in education –shape of things to come. *International Journal of Engineering Research*, 4 :596–598, 11 2015.
- [MK94] Paul Milgram and Fumio Kishino. A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Trans. Information Systems*, vol. E77-D, no. 12 :1321–1329, 12 1994.
- [MLJI19] Chekour Mohammed, Mohammed Laafou, and Rachid Janati-Idrissi. L'évolution des théories de l'apprentissage à l'ère du numérique. 11 2019.
- [MM15] Michael Grahame Moore and Olivier Marty. La théorie de la distance transactionnelle. 2015.

- [MMB08] Teresa Monahan, Gavin McArdle, and Michela Bertolotto. Virtual reality for collaborative e-learning. *Computers & Education*, 50(4) :1339–1353, 2008.
- [MMBM04] Gavin McArdle, T Monahan, Michela Bertolotto, and Eleni Mangina. A web-based multimedia virtual reality environment for e-learning. *Proceedings of Eurographics*, 4 :9–13, 01 2004.
- [MN11] Tassos Mikropoulos and Antonis Natsis. Educational virtual environments : A ten-year review of empirical research (1999–2009). *Computers Education*, 56 :769–780, 04 2011.
- [NAH18] Zinah Tareq Nayyef, Sarah Faris Amer, and Zena Hussain. Peer to peer multimedia real-time communication system based on webrtc technology. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(2.9) :125–130, 2018.
- [NB03] Kristine Nowak and Frank Biocca. The effect of the agency and anthropomorphism on users' sense of telepresence, copresence, and social presence in virtual environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 12 :481–494, 2003.
- [Nie94] Jakob Nielsen. *Usability engineering*. Morgan Kaufmann, 1994.
- [NJDGD06] S. Nogry, Stéphanie Jean-Daubias, and Nathalie Guin-Duclosson. Comment combiner les objectifs et méthodes d'évaluation pour la conception itérative des eiah ? leçons tirées de la conception de ambre-add. 2006.
- [NJDOB04] Sandra Nogry, Stéphanie Jean-Daubias, and Magali Ollagnier-Beldame. Évaluation des eiah : une nécessaire diversité des méthodes. In *Technologies de l'Information et de la Connaissance dans l'Enseignement Supérieur et l'Industrie*, pages 265–271. Université de Technologie de Compiègne, 2004.
- [NICTZ21] richard Ngu leubou, Benoit Crespin, Marc Trestini, and marthe aurelie Zintchem. a web-based collaborative virtual reality environment for distance learning. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 11(3) :182–186, 2021.
- [NWM04] Mehryar Nooriafshar, Ron Williams, and Tek Maraseni. The use of virtual reality in education. pages 6–8, 09 2004.
- [NYC⁺02] Ulrich Neumann, Suya You, Youngkwan Cho, Jongweon Lee, and Jun Park. Augmented reality tracking in natural environments. 01 2002.
- [Ocu19] Oculus. Introducing expressive avatars and new avatar editor, 2019.
- [OKM15] Manuel Olbrich, Jens Keil, and Thomas Makiela. Heritage move a natural & lightweight navigation schema for low-cost, non-stationary immersive virtual environments. In *2015 Digital Heritage*, volume 1, pages 289–292. IEEE, 2015.
- [OOM09] Nassima Ouramdane, Samir Otmane, and Malik Mallem. Interaction 3d en réalité virtuelle - etat de l'art. *Revue des Sciences et Technologies de l'Information - Série TSI : Technique et Science Informatiques*, 28(8) :1017–1049, 2009.
- [OPT17] Lahcen Oubahssi and Claudine Piau-Toffolon. ARVAD : Un environnement virtuel pour l'apprentissage de l'autonomie des déplacements pour les classes ULIS. In *8ème Conférence Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH17)*, pages 209–220, Strasbourg, France, June 2017.

- [oro05] Mobile learning : a handbook for educators and trainers, 2005.
- [P.93] Quéau P. *La pensée virtuelle*. 1993.
- [Par11] Yeonjeong Park. A pedagogical framework for mobile learning : Categorizing educational applications of mobile technologies into four types. *The International Review of Research in Open and Distributed Learning*, 12(2) :78–102, January 2011.
- [PCP+18] Panteleimon Pantelidis, Angeliki Chorti, Ioanna Papagiouvanni, Georgios Paparoidamis, Christos Drosos, Thrasyvoulos Panagiotakopoulos, Georgios Lales, and Michail Sideris. *Virtual and Augmented Reality in Medical Education*. 03 2018.
- [PCPPN79] Jean Piaget, Noam Chomsky, Massimo Piattelli-Palmarini, and Yvonne Noizet. *Théories du langage, théories de l'apprentissage*. Editions du Seuil, 1979.
- [Per14] Daniel Peraya. Distances, absence, proximités et présences : des concepts en déplacement. *Distances et médiations des savoirs. Distance and Mediation of Knowledge*, 2(8), 2014.
- [Pet10] Alexandra Petrakou. Interacting through avatars : Virtual worlds as a context for online education. *Computers Education*, 54(4) :1020–1027, 2010.
- [Pot19] Jack Pottle. Virtual reality and the transformation of medical education. *Future Healthcare Journal*, 6 :181–185, 10 2019.
- [Pui19] Gérard Puimatto. Apprivoiser la distance ? *Distances et médiations des savoirs*, 2019.
- [qChZxJ16] Xue qin Chang, Dao hua Zhang, and Xin xin Jin. Application of virtual reality technology in distance learning. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET)*, 11(11) :76–79, 2016.
- [Ren20] Juliette Renaud. Évaluer l'utilisabilité, l'utilité et l'acceptabilité d'un outil didactique au cours du processus de conception continuée dans l'usage. *Éducation & Didactique*, 14(2) :65–84, July 2020.
- [Riv03] Giuseppe Riva. Applications of virtual environments in medicine. *Methods of information in medicine*, 42 :524–34, 02 2003.
- [Rog19] Sol Rogers. Virtual reality : The learning aid of the 21st century. *Recuperado el*, 28, 2019.
- [RR18] Françoise Raynal and Alain Rieunier. *Pédagogie, dictionnaire des concepts clés : apprentissages, formation, psychologie cognitive*. ESF Sciences Humaines, 2018.
- [Sal04] Imad Saleh. *Enseignement ouvert et à distance : épistémologie et usages*. Hermès Science : Lavoisier, 2004.
- [SC02] Thomas Schubert and Crusius. Five theses on the book problem : Presence in books, film and vr. 2002.
- [SDP+09] Beatriz Sousa Santos, Paulo Dias, Angela Pimentel, Jan-Willem Baggerman, Carlos Ferreira, Samuel Silva, and Joaquim Madeira. Head-mounted display versus desktop for 3d navigation in virtual reality : a user study. *Multimedia tools and applications*, 41(1) :161–181, 2009.
- [Sen90] Bernard Senach. Evaluation ergonomique des interfaces homme-machine : une revue de la littérature. Research Report RR-1180, INRIA, 1990.

- [SES10] A Siméone, J Eneau, and S Simonian. Functions of trust and credibility in an online computer-supported collaborative learning (cscl) task. 2010.
- [SFR01] Thomas Schubert, Frank Friedmann, and Holger Regenbrecht. The experience of presence : Factor analytic insights. *Presence*, 10 :266–281, 2001.
- [She92] Thomas Sheridan. Musings on telepresence and virtual presence. *Presence*, 1 :120–125, 01 1992.
- [SHN19] Maximilian Speicher, Brian Hall, and Michael Nebeling. What is mixed reality? 05 2019.
- [Sie05] George Siemens. Connectivism : A learning theory for the digital age. In *International Journal of Instructional Technology and Distance Learning*, 2005.
- [Sou04] Alexei Sourin. Nanyang technological university virtual campus. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 24 :6 – 8, 12 2004.
- [SP10] Ben Shneiderman and Catherine Plaisant. *Designing the user interface : Strategies for effective human-computer interaction*. Pearson Education India, 2010.
- [Ste00] Jonathan Steuer. Defining virtual reality : Dimensions determining telepresence. *Journal of Communication*, 42, 07 2000.
- [Ste06] L. Sternberger. *Interaction 3-D en réalité virtuelle*. PhD thesis, Université Louis Pasteur - Strasbourg I, 2006.
- [SU93] M. Slater and M. Usoh. Presence in immersive virtual environments. In *Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pages 90–96, 1993.
- [Sut65] Ivan E. Sutherland. The ultimate display. In *Proceedings of the IFIP Congress*, pages 506–508, 1965.
- [Sut68] Ivan E. Sutherland. A head-mounted three dimensional display. AFIPS '68 (Fall, part I), page 757–764, New York, NY, USA, 1968. Association for Computing Machinery.
- [SVRC13] Laurence Schmoll, Manuel Veit, Mickaël Roy, and Antonio Capobianco. Serious game et apprentissage en réalité virtuelle : résultats d'une étude préliminaire sur la mémorisation en langue étrangère. *Synergie Pays germanophones*, 7, 2013.
- [Swa19] Karen Swan. Social construction of knowledge and the community of inquiry framework. In *Open and distance education theory revisited*, pages 57–65. Springer, 2019.
- [Tch09a] Pierre Tchounikine. Précis de recherche en Ingénierie des EIAH. 109 pages, June 2009.
- [Tch09b] Pierre Tchounikine. Précis de recherche en ingénierie des eiah. 2009.
- [TCRP16] Marc Trestini, Bernard Coulibaly, Isabelle Rossini, and Emmanuelle Chevy Pébayle. *Appropriation sociale des MOOC en France*. ISTE Group, 2016.
- [TMK10] Shaveta Thakral, Pratima Manhas, and Chakresh Kumar. Virtual reality and m-learning. *International Journal of Electronic Engineering Research*, 2(5) :659–661, 2010.

- [TNBQ16] Joanna Taoum, Bilal Nakhal, Elisabetta Bevacqua, and Ronan Querrec. Une proposition de conception pour les tuteurs virtuels interactifs dans un environnement informé. In *11e Journées de l'Association Française de Réalité Virtuelle (AFRV 2016)*, 2016.
- [TPSC⁺03] André Tricot, Fabienne Plégat-Soutjis, Jean-François Camps, Alban Amiel, Gladys Lutz, and Agnès Morcillo. Utilité, utilisabilité, acceptabilité : interpréter les relations entre trois dimensions de l'évaluation des EIAH. In Desmoulins, C., Marquet, P., Bouhineau, and D., editors, *Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain 2003*, pages 391–402, Strasbourg, France, April 2003. ATIEF ; INRP.
- [Ver18] Eulalie Verhulst. *Contribution de l'étude de l'interaction en environnement virtuel : intérêt de la charge mentale*. PhD thesis, 12 2018.
- [Viv02] GLIKMAN Viviane. Cours par correspondance au «e-learnig». *Panorama des formations ouvertes et à distance*. Paris, PUF, coll. *Éducation et Formation*, 2002.
- [Vyg80] Lev Semenovitch Vygotsky. *Mind in society : The development of higher psychological processes*. Harvard university press, 1980.
- [WHB⁺07] Werner Wirth, Tilo Hartmann, Saskia Böcking, Peter Vorderer, Christoph Klimmt, Holger Schramm, Timo Saari, Jari Laarni, Niklas Ravaja, Feliz Gouveia, Frank Biocca, Ana Sacau, Lutz Jäncke, Thomas Baumgartner, and Petra Jäncke. A process model of the formation of spatial presence experiences. *Media Psychology*, 9 :493–525, 05 2007.
- [WS98a] B. G. Witmer and M. J. Singer. Measuring presence in virtual environments : A presence questionnaire. *Presence*, 7(3) :225–240, 1998.
- [WS98b] B. G. Witmer and M. J. Singer. Measuring presence in virtual environments : A presence questionnaire. *Presence*, 7(3) :225–240, 1998.
- [WSKS14] Javed Wasim, Sunil Kumar Sharma, Imshad Ahmad Khan, and Jamshed Siddiqui. Web based learning. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 5(1) :446–449, 2014.
- [Xie12] Jingming Xie. Research on key technologies base unity3d game engine. In *2012 7th international conference on computer science & education (ICCSE)*, pages 695–699. IEEE, 2012.
- [YJSZ09] Teng Yingyan, Zheng Jun-Sheng, and Gao Zhijun. Design and implementation of interactive 3d scenes based on virtools. In *2009 International Forum on Computer Science-Technology and Applications*, volume 2, pages 87–89. IEEE, 2009.
- [You03] Christine Youngblut. Experience of presence in virtual environments. *Institute for Defense Analyses*, page 149, 2003.
- [YTGC13] Rabia M Yilmaz, F Burcu Topu, Yuksel Goktas, and Murat Coban. Social presence and motivation in a three-dimensional virtual world : An explanatory study. *Australasian Journal of Educational Technology*, 29(6), 2013.
- [ZBM94] Shumin Zhai, William Buxton, and Paul Milgram. The “silk cursor” : Investigating transparency for 3d target acquisition. In *Proceedings of the SIGCHI Conference*

on Human Factors in Computing Systems, CHI '94, page 459–464, New York, NY, USA, 1994. Association for Computing Machinery.

- [Zel92] D. Zeltzer. Autonomy, interaction, and presence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 1 :127–132, 1992.
- [Zik] Collaboratif d'apprentissage interactif à distance basé sur la réalité virtuelle avec le sujet du système solaire. In *2018 19e Conférence internationale IEEE / ACIS sur le génie logiciel, l'intelligence artificielle, la mise en réseau et le calcul parallèle / distribué (SNPD)*, pages 4–9.
- [ZJ98] Pavel Zahorik and Rick L Jenison. Presence as being-in-the-world. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 7(1) :78–89, 1998.
- [ZLGB03] Xiaowei Zhong, Peiran Liu, Nicolas Georganas, and Pierre Boulanger. Designing a vision-based collaborative augmented reality application for industrial training. *it - Information Technology*, 45 :7–19, 01 2003.

Annexe 1 : questionnaire de Nowak (voir référence [NB03])

Items assessing perceived other's copresence :

1. My interaction partner was intensely involved in our interaction.
2. My interaction partner seemed to find our interaction stimulating.
3. My interaction partner communicated coldness rather than warmth.
4. My interaction partner created a sense of distance between us.
5. My interaction partner seemed detached during our interaction.
6. My interaction partner was unwilling to share personal information with me.
7. My interaction partner made our conversation seem intimate.
8. My interaction partner created a sense of distance between us (this item is identical to the fourth item of this scale, perhaps by mistake).
9. My interaction partner created a sense of closeness between us.
10. My interaction partner acted bored by our conversation.
11. My interaction partner was interested in talking to me.
12. My interaction partner showed enthusiasm while talking to me.

Items assessing self-reported copresence :

1. I did not want a deeper relationship with my interaction partner. 73
2. I wanted to maintain a sense of distance between us.
3. I was unwilling to share personal information with my interaction partner.
4. I wanted to make the conversation more intimate.
5. I tried to create a sense of closeness between us.
6. I was interested in talking to my interaction partner.