

THÈSE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITÉ D'ANGERS
COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

École Doctorale N°601
*Mathématique et Sciences et Technologies
de l'Information et de la Communication*
Spécialité : Informatique
Par

Pierre GAC

**Conception et évaluation d'environnements virtuels pédagogiques :
Application à la formation professionnelle**

Thèse présentée et soutenue à ANGERS , le 17 Septembre 2020
Unité de recherche : **Laboratoire Angevin de Recherche en Ingénierie des Systèmes (LARIS - EA7315)**

Rapporteurs avant soutenance :

Domitile Lourdeaux, Maîtresse de conférences, Université de Technologie de Compiègne

Ronan Champagnat, Maître de conférences, IUT de la Rochelle

Composition du jury :

Président : Professeur Samir Otmane, Université d'Évry Paris Saclay

Examineurs : Professeure Dominique Bechmann, Université de Strasbourg

Professeur Samir Otmane, Université d'Évry Paris Saclay

Professeur Ronan Querrec, École Nationale d'Ingénieurs de Brest

Domitile Lourdeaux, Maîtresse de conférences HDR, Université de Technologie de Compiègne

Ronan Champagnat, Maître de conférences HDR, IUT de la Rochelle

Directeur de thèse : Paul RICHARD, Maître de conférences HDR, Université d'Angers

Co-encadrants de thèse : Professeur Sébastien George, Le Mans Université

Emmanuelle Richard, Maîtresse de conférences, Université d'Angers

Invité : Yann Papouin Ingénieur R&D, DEC Industrie

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de thèse, **Paul Richard** pour m'avoir conseillé et aidé tout au long de cette thèse, surtout lors de l'épreuve de la rédaction du manuscrit. Je remercie **Sébastien George** et **Emmanuelle Richard** d'avoir co-encadré cette thèse et également pour leurs suggestions et remarques pour la conduite des expérimentations ainsi que la rédaction du manuscrit.

Cette thèse n'aurait pas pu se faire sans l'entreprise **DEC Industrie** qui a permis de mettre en place la convention **CIFRE**, de même que l'**ANRT**. Je tiens également à adresser mes remerciements **aux collègues de DEC Industrie** qui ont su soutenir ces travaux de thèse et également pour leur contribution à une excellente ambiance de travail et également d'avoir accepté de servir de cobayes pour les prétests des interactions et applications virtuelles.

Je remercie **Domitile Lourdeaux** et **Ronan Champagnat** d'avoir accepté d'être rapporteurs pour cette thèse, de même que **Samir Otmane**, **Dominique Bechmann** et **Ronan Querec** d'être examinateurs de cette thèse.

Je souhaite par la même occasion remercier toute **l'équipe du LARIS et du LIUM** pour m'avoir conseillé et orienté tout au long de cette thèse.

Je remercie les **enseignants** qui ont participé aux échanges lors de la conception des différents scénarios. Merci à eux de m'avoir accordé de leur précieux temps. Sans eux je n'aurais pas pu réaliser les expérimentations ainsi que les prétests. Merci aux **inspecteurs académiques** qui m'ont permis d'entrevoir plus précisément la réalité des enseignements professionnels et les contraintes rencontrées sur le terrain.

Je remercie ma famille qui a su me soutenir dans la rédaction du manuscrit, notamment pendant cette première moitié de l'année 2020 qui a été particulièrement difficile. Je remercie mes amis qui ont m'ont soutenu et ont fait preuve de curiosité vis-à-vis de ces travaux de recherche. Je remercie également ceux qui m'ont accompagné pendant cette thèse, même si certains n'ont pas eu la force de me soutenir dans les derniers instants de ces travaux alors que j'en avais absolument besoin.

*À ceux qui m'ont quitté pendant cette thèse et qui ne pourront jamais voir
l'aboutissement de ces années de thèse.*

SOMMAIRE

1	Introduction	17
1.1	Contexte de la recherche	18
1.1.1	La formation professionnelle	21
1.1.2	Le cursus professionnel	23
1.1.3	Les problèmes de l'enseignement professionnel	25
1.1.4	Modernisation des enseignements	27
1.2	Cadre technologique	28
1.2.1	La Réalité Virtuelle	28
1.2.2	Considérations du terrain	30
1.2.3	Objectifs de la thèse	31
1.2.4	Éléments de problématique	33
1.2.5	Plan du manuscrit	36
I	État de l'art	39
2	Approches pour la formation professionnelle	40
2.1	La didactique professionnelle	40
2.1.1	Définitions	40
2.1.2	Approche par compétences	42
2.1.3	Évaluation de la performance d'un apprenant	45
2.1.4	La simulation comme support d'apprentissage et d'évaluation	47
2.2	Utilisation de la réalité virtuelle pour la formation professionnelle	50
2.2.1	Utilisation de la RV	50
2.2.2	Scénarisation d'une activité pédagogique	58
2.2.3	Système adaptatif	60
2.2.4	Consignes et évaluation de l'apprenant	62
2.2.5	La RV comme support d'évaluation de la performance	65
2.3	Synthèse	66

3 Outils et techniques d'interactions 3D	67
3.1 La Réalité Virtuelle	67
3.1.1 Concepts et définition	67
3.1.2 Caractéristiques fondamentales	70
3.2 Les outils d'immersion	74
3.2.1 Outils semi-immersifs	74
3.2.2 CAVE	75
3.2.3 Casques de RV	76
3.3 Techniques d'interaction	78
3.3.1 La navigation en environnement virtuel	79
3.3.2 La sélection et manipulation en environnement virtuel	81
3.3.3 Contrôle d'application	84
3.4 Aides virtuelles	87
3.4.1 Guides virtuels	87
3.4.2 Agents pédagogiques virtuels	89
3.5 Processus de création d'EV pédagogique	92
3.5.1 Approche générale	92
3.5.2 Diégétique	95
3.6 Utilisabilité, Expérience Utilisateur et Performance	98
3.6.1 Définitions	98
3.6.2 Application aux interfaces utilisateur	100
3.6.3 Évaluation de la performance	102
3.7 Synthèse	104
II Contributions	107
4 Approche générique pour la conception d'EV pour la formation	108
4.1 Proposition d'un modèle générique	109
4.1.1 Évolution du matériel	111
4.1.2 Processus de simplification d'une interaction	113
4.1.3 Modélisation du monde virtuel pédagogique	117
4.2 Modélisation des interactions	119
4.2.1 Technique de sélection proposée	120
4.2.2 Technique de navigation proposée	125

4.2.3	Gestion des obstacles en EV	128
4.2.4	Déplacement d'objets	132
4.2.5	Mode tutorat synchrone	140
4.3	Modules d'accompagnement	143
4.3.1	Tablette virtuelle	144
4.3.2	Les consignes données à l'apprenant dans l'EV	148
4.3.3	Guidance de l'apprenant	151
4.4	Synthèse	158
5	Transposition d'une activité réelle en activité virtuelle	161
5.1	Processus de transposition	161
5.1.1	Positionnement sur les approches de conception	162
5.1.2	Situations de conception de nouvelles activités virtuelles	167
5.1.3	Modélisation du processus de conception	168
5.2	Implémentation du scénario pédagogique	176
5.2.1	Module de gestion des activités	176
5.2.2	Variables didactiques	182
5.3	Exploitation pédagogique	185
5.3.1	Avant la session virtuelle	186
5.3.2	Gestion des traces numériques	187
5.3.3	L'approche par rapport d'activité	189
5.3.4	Entretien d'explicitation	190
5.4	Synthèse	195
6	Implémentations de scénarios pédagogiques et évaluation de la proposition	199
6.1	Scénario pédagogique pour le BAC Pro Commerce	200
6.1.1	Écriture des activités pédagogiques de l'EVAH	200
6.1.2	Implémentation des activités pédagogiques	207
6.1.3	Traces et exploitation pédagogique	209
6.1.4	Prétests sur le terrain	210
6.1.5	Les apports de ces tests préliminaires	213
6.2	Autres situations virtuelles implémentées	215
6.2.1	Activités de pilotage de ligne de production	215
6.2.2	Application de revue de chantier	218

6.3	Évaluation du scénario Bac Pro Commerce	219
6.3.1	Objectifs	219
6.3.2	Population de l'expérimentation	222
6.3.3	Création de la situation expérimentale	224
6.3.4	Réalisation des expérimentations	226
6.4	Résultats	229
6.4.1	Analyse des traces	229
6.4.2	Étude des facteurs temporels	230
6.4.3	Stratégies de navigation dans l'EV	234
6.4.4	Utilisation de la tablette virtuelle	236
6.4.5	Influence du contexte pédagogique sur la performance des ap- prenants	241
6.4.6	Processus d'évaluation par les enseignants	243
6.4.7	Étude des entretiens post-expérimentaux	247
6.5	Discussion	252
6.5.1	Temporalité de l'activité pédagogique	252
6.5.2	Navigation dans l'EV	253
6.5.3	Les usages de l'outil	254
6.5.4	Utilisation de la tablette virtuelle	256
6.5.5	Réussite de l'activité pédagogique	256
6.5.6	Processus d'évaluation de l'apprenant	257
6.6	Synthèse	258

III Perspectives et conclusion 261

7	Conclusion générale 262
7.1	Contexte et objectifs de recherche 262
7.2	Conception de scénarios pédagogiques 263
7.3	Implémentation du scénario virtuel 264
7.4	Exploitation pédagogique de scénarios virtuels 265
7.5	Synthèse des contributions 268
7.6	Perspectives proposées 270
7.6.1	Création d'activité pédagogique 270
7.6.2	Suivi du parcours pédagogique 271

Glossaire	273
Acronymes	275
Bibliographie	275
Annexes	293
A Exemples de formalisme d'aide à la création d'activités pédagogiques	294
B Réalisation de l'expérimentation	298
C Extrait du référentiel du Bac Pro Commerce	303
D Questionnaire pour l'apprenant	308
E Questionnaire pour les enseignants	321
F Fichiers de données JSON	337

TABLE DES FIGURES

1.1	Exemples d'équipements industriels présents dans les lycées.	19
1.2	Exemples de maquettes pédagogiques utilisées dans les lycées.	20
1.3	Les ressorts de la RV selon Radigois (2018).	29
1.4	Virtualisation d'une ligne de production.	30
2.1	Métareprésentation d'une compétence selon Paquette (2002a).	44
2.2	L'application de Kaddour <i>et al.</i> (2020) permet de visualiser plusieurs organes en RV.	51
2.3	Modèle de Gallagher <i>et al.</i> (2005) de la répartition des ressources cognitives entre un chirurgien novice, <i>pré-entraîné</i> et expert. Le chirurgien novice pré-entraîné maîtrise déjà des compétences grâce à la simulation, réduisant ainsi les ressources cognitives allouées à ces compétences.	52
2.4	Résumé des étapes de conception d'une application de RV médicale selon Górski <i>et al.</i> (2017).	53
2.5	Le système AVML de Wasfy <i>et al.</i> (2005).	54
2.6	L'utilisation de la RA sur une machine à commande numérique dans l'étude de Minoufekar <i>et al.</i> (2019).	55
2.7	L'EV utilisé dans l'étude de Makransky et Petersen (2019).	56
2.8	Relances par QR code décrites par Temperman <i>et al.</i> (2017).	64
3.1	Modèle technocentré des 3I ² de Fuchs <i>et al.</i> (2001).	70
3.2	Les trois niveaux d'immersion étudiés par Rose <i>et al.</i> (2018).	72
3.3	Tâches virtuelles impliquant des dispositifs semi-immersifs.	75
3.4	Utilisateur en immersion dans un CAVE.	76
3.5	Casques de réalité virtuelle commerciaux.	77
3.6	Typologie de Boletsis (2017).	80
3.7	Utilisation d'interfaces dans le repère 3D.	85
3.8	Notifications 3D décrites dans Rzayev <i>et al.</i> (2019).	86
3.9	Illustration d'un guide virtuel répulsif (Otmane, 2000).	89

3.10 Avatar de l'utilisateur présent dans une zone à risques dans un scénario d'habilitation électrique. Il n'est pas possible pour un agent incarné d'être présent dans la même zone. Pour avoir de l'assistance, l'apprenant doit donc descendre de la gazelle et naviguer vers l'agent pédagogique qui est à l'extérieur de la zone de travail.	92
3.11 Exemple de deux interface diégétiques.	96
3.12 Metamodelle de classification décrit par Fagerholt et Lorentzon (2009).	97
3.13 Styles graphiques d'interfaces.	101
3.14 Classification des méthodes d'évaluation synthétisées dans Richard (2011).	103
4.1 Contrôleurs utilisés par différents casques de RV.	112
4.2 Exemple volontairement simplifié de séquençement d'une action pédagogique dans le monde virtuel.	114
4.3 Exemple simplifié d'un processus d'étayage sur une action virtuelle liée à un tournevis.	116
4.4 Illustration d'un outil spécifique, DDT, demandant une gestuelle obligatoire et nécessaire pour une activité de réparation de prise électrique.	116
4.5 Représentation schématique d'un EV pour la formation professionnelle.	118
4.6 Représentation des différents modules d'interaction au sein de la modélisation de l'EV proposée.	119
4.7 Technique de sélection.	120
4.8 Utilisation d'un <i>highlight</i> sur une bouteille.	122
4.9 Modélisation UML simplifiée de l'approche <i>Device-Target</i> . L'outil par défaut (<i>DeviceDefault</i>) correspond à la main de l'utilisateur, et il est seulement possible d'interagir (sélection et manipulation) avec cet outil sur les objets de type <i>ITargetDefault</i> . L'utilisateur ne connaît pas le type d'outil actuellement en main, car il manipule l'interface <i>IUserDevice</i> , ce qui autorise l'implémentation d'une multitude d'outils.	123
4.10 Modélisation UML simplifiée de l'implémentation d'un outil tournevis (appelé <i>DeviceScrewDriver</i>) en plus de l'outil par défaut. L'objet <i>ScrewDriverBehaviour</i> permet de prendre en main l'outil tournevis à partir de l'outil par défaut (<i>DeviceDefault</i>). Par la suite, le tournevis peut interagir uniquement avec les objets implémentant l'interface <i>ITargetScrewDriver</i> . Au relâchement de l'outil tournevis, l'outil par défaut est de nouveau activé.	124
4.12 Techniques de téléportation.	125

4.11	Processus d'action sur un objet virtuel de type <i>Vis</i> en suivant l'approche <i>Device-Target</i>	126
4.13	Illustration d'un cas spécifique où un utilisateur souhaite se téléporter au delà de D_{max} . La parabole est automatiquement bornée à D_{max}	128
4.14	Chronogrammes de la réponse du module de téléportation en fonction de l'état du bouton de téléportation.	129
4.15	Synthèse du processus de téléportation proposé.	130
4.16	Diagramme de la taxonomie des obstacles proposée.	130
4.17	Exemple d'obstacles dans une situation virtuelle.	132
4.18	Zones de placement décrites dans le module de déplacement d'objets par contraintes décrit par Goesele et Stuerzlinger (1999).	134
4.19	Diagramme de classe simplifié du module de <i>Snapping</i>	135
4.20	Vue éditeur de la mise en place des scripts du module de déplacement dans <i>Unity3D</i>	136
4.21	Illustration de l'importance de prendre en compte les normales, afin d'éviter de placements incohérents.	137
4.22	Placement d'objets dans le monde virtuel en utilisant le module de <i>Snapping</i>	138
4.23	Exemples d'utilisation des fonctions avancés du <i>Snapping</i>	139
4.24	Représentation schématique du module de tutorat au sein du scénario virtuel. Des types de communications sont possibles, à l'oral ou via le système immersif.	140
4.25	Vue de l'écran du poste de tutorat synchrone sur lequel un autre utilisateur a indiqué à l'apprenant en immersion de regarder les boîtes sur le bureau à l'aide d'un outil de tutorat.	143
4.26	Vue d'ensemble schématique des modules d'accompagnements abordés dans cette section.	144
4.27	Exemples de situation où la présence d'avatar de contexte est justifiée par le scénario pédagogique.	146
4.28	Sélection des éléments de la tablette virtuelle via le <i>raycasting</i> . Cet écran permet à l'apprenant de faire apparaître des objets dans le monde virtuel directement depuis la tablette.	147
4.29	Diagramme de classe simplifié du module de la tablette virtuelle.	148

4.30	Représentation des différents niveaux de consignes pour une activité de mise en rayon. Les catégories et actions ont été simplifiées pour plus de clarté.	150
4.31	Affichage d'une consigne sur la tablette virtuelle suivant les trois niveaux d'apprenants novice, intermédiaire, avancé.	150
4.32	Diagramme de classe simplifié du module <i>ActivityTracker</i> . Chaque tutoriel est composé de plusieurs étapes. Ces dernières peuvent être modulées par des paramètres spécifiques (<i>TrackerStepSettings</i>).	154
4.33	Utilisation du tutoriel en situation virtuelle avec l'utilisation de guides virtuels pour indiquer la destination et les objets sur lesquels agir.	155
4.34	Exemple de séquence pour plusieurs niveaux d'apprenants. Le niveau avancé comporte une étape unique, qui demande à l'apprenant d'effectuer une vérification des produits avant de commencer la mise en rayon (vérification des références). En mode avancé, des aléas peuvent être introduits dans les produits.	156
4.35	Différents cas de placement de palettes considérés corrects par le module car la distance entre la gondole et la palette est jugée acceptable. .	157
5.1	Processus de conception d'une application de RV appliquée à la formation professionnelle.	169
5.2	Vue d'ensemble schématique des briques logicielles proposées permettant d'implémenter et d'agir sur un scénario pédagogique.	176
5.3	Diagramme de classe simplifié du module d'activité.	177
5.4	Exemple d'activité non linéaire simple où l'apprenant est libre de choisir la façon dont la tâche sera réalisée.	179
5.5	Exemple simplifié de l'influence des variables didactiques sur l'EV. Chaque variable didactique déclenche automatiquement une action précise dans l'EV avant le démarrage de l'activité pédagogique.	183
5.6	Exemple d'interfaces graphiques permettant à un enseignant de paramétrer des variables didactiques pour une activité de mise en rayon. . .	185
5.7	Exemple de rapport d'activité pour une activité d'habilitation électrique B1.	190
5.8	Processus de génération d'un rapport d'activité.	191
5.9	Diagramme de classe simplifié de la structure informatique d'un rapport d'activité.	192

TABLE DES FIGURES

6.1	Plan du magasin virtuel.	208
6.2	Exemple d'interaction via <i>raycasting</i> pour sélectionner un objet dans la réserve du magasin virtuel.	209
6.3	Exemple de catalogue préparé via un logiciel de bureautique à partir des données issues de l'application virtuelle (visuels des produits).	210
6.4	Premier prototype de la tablette virtuelle ne prenant pas en compte le profil des élèves. Les applications comportaient très peu de texte, ce qui a eu pour effet de perdre les apprenants.	214
6.5	Ligne de production virtuelle en fonctionnement. L'utilisateur est en train d'interagir sur le pupitre de la machine pour arrêter la production.	216
6.6	Constatation d'un défaut lors de la revue de chantier. L'apprenant doit prendre une photographie du problème constaté à l'aide de la tablette virtuelle.	218
6.7	Organisation possible des tâches réalisables par apprenant pendant l'expérimentation. Il s'agit d'une approche possible parmi d'autres. Ce séquençement a été validé par les enseignants comme étant le « <i>cas idéal de réalisation</i> ».	225
6.8	Représentation schématique de la procédure de l'expérimentation.	228
6.9	Données temporelles de la session virtuelle ($n = 36$).	231
6.10	Répartition des temps en fonction du type d'interaction ($n = 36$).	232
6.11	Classification des participants selon le temps passé dans le monde virtuel.	233
6.12	Répartition des événements de téléportation (déclenchements et temps) ($n = 36$).	235
6.13	Données relatives à la tablette virtuelle (objectives et subjectives).	238
6.14	Données de clics sur la tablette virtuelle ($n = 36$).	239
6.15	Classification en fonction des variables de la tablette virtuelle. De gauche à droite : TB_A, TB_B, TB_C	240
6.16	Résultats du questionnaire des apprenants à propos de la compréhension des consignes et de l'estimation du succès de l'activité ($n = 37$).	243
6.17	Répartition des enseignants participants à l'expérimentation en fonction des filières dans lesquelles ils enseignent ($n = 16$).	245
6.18	Données subjectives des enseignants à propos de l'entretien d'explicitation ($n = 16$).	246

6.19 Réponses au questionnaire enseignant à propos de la pertinence des outils pour conduire le débriefing ($n = 16$). Le score correspond aux intitulés des réponses sur le questionnaire, avec 0=Pas du tout d'accord et 5=Tout à fait d'accord.	249
6.20 Appréciations des enseignants à propos des deux méthodes d'évaluation ($n = 16$).	250
A.1 Modèle de formalisme pour la conception d'activités virtuelles utilisé dans les filières STI2D.	295
A.2 Application du modèle STI2D au référentiel du Bac Pro Commerce. . .	296
A.3 Exemple de document décrivant les tâches pour une situation pédagogique de PLP. Ce document constitue la demande initiale du client, sur lequel le concepteur doit s'appuyer pour concevoir et implémenter l'activité pédagogique.	297
C.1 Extrait du bloc 4A du référentiel du Bac Pro Commerce (2019) sur lequel sont basées les activités pédagogiques virtuelles conçues.	307

LISTE DES TABLEAUX

3.1	Recommandations d'implémentation des messages en RV par Rzayev <i>et al.</i> (2019).	86
4.1	Données utilisés lors des <i>raycasts</i> , noté <i>R</i>	121
5.1	Représentation des éléments informatiques qui composent un rapport d'activité.	193
6.1	Participants au premier test du magasin pédagogique virtuel.	211
6.2	Participants à l'expérimentation.	223
6.3	Grille d'évaluation conçue par les enseignants pour cette expérimentation.	226
6.4	Groupes de participants classés selon le temps total passé dans le monde virtuel. Compte tenu des aléas expérimentaux, seuls 36 participants ont terminé l'activité et présentent des traces exploitables pour cette analyse.	233
6.5	Réponses au questionnaire sur la téléportation.	236
6.6	Répartition des apprenants en fonction de l'établissement.	244
6.7	Origine des interventions des enseignants lors de l'observation de l'activité pédagogique.	246
6.8	Comparaison des deux méthodes d'évaluation par les enseignants dans le questionnaire.	247
6.9	Récapitulatif des hypothèses de l'expérimentation.	260
B.1	Exemple de réalisation de l'expérimentation en suivant les étapes dites « idéales ». D'autres approches de réalisation valides sont également possible.	298

INTRODUCTION

Le numérique est omniprésent dans nos sociétés modernes. La technologie est globalement implantée dans de nombreux domaines et il est maintenant impensable de s'en séparer. Dans les entreprises de services, et même dans l'industrie, le numérique représente une part de marché non négligeable et ne pas être à jour techniquement laisse le champ libre à la concurrence. Le monde du travail évolue au rythme des révolutions technologiques. En effet, les outils numériques permettent d'assister les utilisateurs et d'augmenter la productivité.

L'éducation n'est pas exempte de ce virage technologique, cependant il tend à prendre plus de temps que les autres domaines. Les écarts entre les outils utilisés dans le champ éducatif et professionnel tendent à se creuser. Ainsi l'éducation nationale (EN) fait son possible pour permettre l'égalité des chances aux élèves issus de milieux sociaux culturels différents, en dotant les établissements scolaires d'outils adaptés aux élèves et aux missions pédagogiques. C'est en particulier le cas pour la formation professionnelle.

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse portent sur la conception et l'évaluation d'environnements virtuels dans le contexte de la formation professionnelle. Ils ont été réalisés dans le cadre d'un contrat CIFRE et sont le fruit d'une collaboration entre l'entreprise DEC Industrie, le Laboratoire Angevin de Recherche en Ingénierie des Systèmes (LARIS) de l'Université d'Angers et le Laboratoire d'Informatique de l'Université du Mans (LIUM). L'objectif de ce travail est de concevoir et d'évaluer des applications immersives de formation en contexte de formation professionnelle. Pour ce faire, nous avons collaboré avec des inspecteurs académiques et des enseignants de l'EN, principalement dans le contexte des lycées professionnels de l'académie de Nantes. En effet, cette académie souhaite être pilote de la transition numérique en particulier dans la formation professionnelle.

Les expériences passées des enseignants avec le numérique ont souvent été infructueuses, ce projet de recherche vise donc à proposer des outils que les enseignants soient en mesure de s'approprier et d'utiliser à des fins pédagogiques. Ceci implique la mise en place d'outils simples d'utilisation et paramétrables par les enseignants.

Lors de ces travaux, nous nous sommes basés sur l'expérience des deux laboratoires impliqués dans cette recherche, à savoir le LARIS et le LIUM. Le LARIS a beaucoup expérimenté les outils numériques dans un contexte médical et psychologique, notamment en collaboration avec le Laboratoire de Psychologie des Pays de la Loire (LPPL), avec lequel divers projets de recherche ont été mis en place comme une application de rééducation pour les enfants paralysés (Michel *et al.*, 2016), ou encore une cuisine virtuelle destinée aux personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer (Foloppe *et al.*, 2018). Dans chacun de ces contextes de recherche, la pertinence des interactions est étudiée afin de proposer des techniques d'interaction et des interfaces utilisables par le public visé. Grâce aux autres travaux du LARIS, qui a également effectué des recherches dans l'éducation (Richard *et al.*, 2006), nous avons été sensibilisés aux notions d'ergonomie et de charge cognitive (Sweller, 1988) liée à l'interaction (Verhulst, 2019). Le LIUM est spécialisé dans l'étude des environnements informatiques pour l'apprentissage humain (EIAH). Le LIUM a pu apporter ses compétences pour l'élaboration de modèles informatiques ainsi que pour la conception de méthodes expérimentales. Cette thèse s'est donc organisée entre l'entreprise DEC Industrie pour la partie technique et mise en place des différentes approches dans les lycées, ainsi qu'au sein du LARIS où la partie recherche s'est organisée autour de problématiques liées à l'utilisation des nouvelles méthodes numériques en pédagogie. Des séjours ponctuels ont été réalisés au LIUM.

1.1 Contexte de la recherche

Ainsi, ces travaux de recherche s'inscrivent dans les problématiques abordées par la société DEC Industrie, le LIUM et la LARIS. L'entreprise est spécialisée depuis le début des années 2000 dans la conception de maquettes pédagogiques destinées aux

lycées professionnels, IUT, BTS et autres centres de formations. Les formations ciblées sont majoritairement dans le domaine des Sciences et Technologies Industrielles (STI, STI2D à partir de la réforme de 2011), que ce soit en formation initiale ou continue. Les maquettes pédagogiques conçues par DEC Industrie suivent le rythme des réformes des diplômes afin de pouvoir s'inscrire dans une dynamique de suivi de l'évolution du contexte éducatif français.



(a) Remplisseuse industrielle.



(b) Fardeleuse industrielle.

FIGURE 1.1 – Exemples d'équipements industriels présents dans les lycées.

Dans le milieu de la formation professionnelle, précisément pour les filières STI2D, les enseignements utilisent pour les travaux pratiques des machines issues du monde industriel, mais également des modèles plus compacts, créés exclusivement pour des utilisations didactiques. Nous qualifions cela de *maquettes pédagogiques*. Ces dernières sont des supports utilisés dans tous les établissements, permettant aux élèves de pratiquer dans des conditions contrôlées ou scénarisées, comme une panne de capteur sur une machine industrielle. Les maquettes sont omniprésentes dans les lycées dispensant ce type de formation. DEC Industrie est spécialisé dans la conception de maquettes pédagogiques comme les lignes de productions pour les filières de Pilotage de Ligne de Production (PLP) et de supports de formation pour la formation professionnelle. La figure 1.1a montre une machine utilisée dans l'industrie qui permet de remplir des bouteilles sur des lignes de productions à cadence moyenne. Dans les lycées, cette machine permet aux élèves d'apprendre à faire une mise en route de production de même que gérer les aléas potentiels. Certains établissements peuvent combiner plusieurs machines industrielles pour simuler une ligne de production com-

plète où une machine appelée *fardeleuse* (Figure 1.1b) va faire des packs de bouteilles en aval de la remplisseuse. Ces deux machines sont initialement utilisées dans l'industrie, mais ont été modifiées pour correspondre aux approches et attentes de la formation professionnelle dans les lycées. Ces modifications peuvent être à propos de la sécurité, les approches didactiques ou encore une amélioration de la mise en fonctionnement pour pouvoir s'adapter aux contraintes temporelles des travaux pratiques.



(a) Maquette sur la gestion domotique d'une habitation.



(b) Maquette sur le câblage de fibre optique.

FIGURE 1.2 – Exemples de maquettes pédagogiques utilisées dans les lycées.

Alternativement aux répliques de systèmes industriels, il est aussi possible d'avoir des systèmes plus compacts tels qu'une maquette représentant le câblage fibre optique d'un immeuble entier (Figure 1.2b), ou encore la gestion domotique d'une maison (Figure 1.2a). Les filières tertiaires comportent également des plateaux techniques avec des équipements réels. Bien que la nature de ces équipements diffère des maquettes de STI2D, le principe reste identique, à savoir simuler des situations professionnelles emblématiques au sein des établissements, dans un milieu contrôlé et propice à l'enseignement. Pour la filière commerce, on peut par exemple rencontrer des magasins pédagogiques qui simulent les équipements qu'un apprenant peut rencontrer dans un véritable magasin, à savoir des étagères, des produits ou encore de la signalétique. Ces maquettes, que ce soit les approches compactes ou la simulation à l'aide de machines industrielles, servent de support dans les travaux pratiques en

permettant de faire un lien entre la partie formation à l'école et la partie stage en entreprise. Nous nuancerons dans ce manuscrit l'utilisation et l'intérêt des maquettes, car cette approche repose sur plusieurs facteurs qui dépendent des établissements et des politiques d'enseignements qui y sont liés.

Le savoir-faire industriel seul ne suffit pas pour concevoir des outils pédagogiques, il faut avoir la connaissance du terrain, c'est à dire des établissements (dans notre cas, il s'agit des lycées professionnels), des enseignants, des élèves ainsi que des pratiques d'enseignements mises en place au rythme des réformes qui définissent la formation professionnelle en France. Avec la numérisation des contenus et des activités pédagogiques, DEC Industrie a souhaité mettre à contribution ce savoir-faire industriel et ces connaissances pédagogiques au profit de la création de situations de formation utilisant le numérique, plus particulièrement en mobilisant la Réalité Virtuelle (RV). Cette approche numérique permet de contextualiser plus précisément les maquettes pédagogiques et les autres équipements didactiques qui sont présents dans les plateaux techniques des lycées. Par exemple en modélisant et en simulant en 3D une usine complète interactive dans laquelle l'apprenant peut s'immerger et effectuer des tâches pédagogiques, de même que se former sans risques.

1.1.1 La formation professionnelle

En France, historiquement, les parents et les équipes enseignantes dans les collèges et lycées poussent les élèves à s'orienter vers les filières générales considérées comme étant la norme. Les filières professionnelles sont malheureusement souvent dévalorisées où l'orientation est subie et non choisie (Calvez et Régis, 2018). Par exemple les élèves en difficultés dans les collèges entendent que s'ils ne travaillent pas assez, ils risquent de finir en lycée professionnel, car les lycées généraux n'accepteront pas leurs dossiers. Les cursus professionnels ont donc progressivement été présentés comme « une voie de garage » où les soi-disant « mauvais » élèves sont envoyés. Par ailleurs, il est intéressant de souligner le fait que certains élèves souhaitent suivre un cursus professionnel (mécanicien, boulanger, travaux paysagers, etc..), mais sous prétexte qu'ils peuvent avoir de bons résultats, ils sont poussés à continuer vers les filières générales. De ce fait, les élèves ayant un réel projet professionnel ainsi que

de la motivation se retrouvent dans la voie générale où ils n'auront peut-être pas leur place et finiront éventuellement par décrocher. Cette crise des vocations est un réel problème, car l'équilibre entre profils professionnels et profils généraux est primordial pour une économie solide (Stromquist, 2019).

La situation de l'emploi en France a aussi fortement contribué à desservir la formation professionnelle. Les industries françaises ont progressivement délocalisé leurs productions dans des pays ayant une main d'œuvre moins chère et une fiscalité plus avantageuse, donnant donc l'image de ne plus avoir besoin de main d'œuvre qualifiée pour des postes industriels. Les élèves ont été orientés vers des formations dites « classiques », car l'employabilité des personnes ayant un diplôme professionnel semblait plus faible que ceux ayant un baccalauréat scientifique avec une poursuite d'étude dans le supérieur. Cependant, force est de constater que de nos jours les emplois industriels sont de plus en plus demandés. De plus en plus d'entreprises ont des difficultés à recruter du personnel qualifié ; or dans l'industrie, le produit fini vendu au client est généralement réalisé par du personnel qualifié issu de formations professionnelles. Cette situation handicape donc les industriels français qui ne peuvent pas se développer convenablement, d'autant plus que certaines régions de France ont une attractivité moindre par rapport à d'autres. À titre d'exemple, l'entreprise DEC Industrie, dans laquelle ont été réalisés ces travaux de thèse, constate quotidiennement ces problématiques de recrutement lié au manque de main d'œuvre qualifiée dans le secteur géographique du Mans.

La mission des organismes de formation professionnels tels que les lycées est donc de plus en plus importante et a un impact direct sur les différents bassins d'emplois locaux et finalement, sur la richesse du pays. De leur côté, les industriels contribuent également à former de plus en plus leur personnel en interne. Cela permet d'avoir une main d'œuvre experte et de fidéliser les salariés à l'entreprise en raison des investissements de formation. Cependant les PME qui n'en ont pas les moyens se retrouvent dans des situations délicates où le personnel doit être mobilisable sur le champ et où il n'y a pas le temps ni les finances pour assurer des formations complexes en interne.

1.1.2 Le cursus professionnel

En France, la formation dans les lycées est divisée en trois parties, les filières dites « générales » (53,5% des candidats au BAC 2019), la filière Technologique (21% des candidats au BAC 2019) et la filière professionnelle (25.5% des candidats au BAC 2019)¹. Certaines réformes récentes telles que la réforme de la voie professionnelle² ont pour but de promouvoir la formation professionnelle ainsi que de la moderniser. En filière professionnelle, les élèves suivent un cursus divisé en trois ans à la manière des filières générales, de la classe de seconde à la classe de terminale. Les apprenants sont âgés en moyenne de 15 ans à 18 ans et sont préparés à des métiers spécifiques grâce à une spécialisation progressive (Calvez et Régis, 2018). L'objectif de ces formations professionnelles c'est de former du personnel mobilisable professionnellement directement après le lycée, à la différence des filières générales où la poursuite d'étude est nécessaire pour pouvoir être employable. Chaque filière est spécifique à certains métiers. Par exemple les jeunes peuvent suivre un cursus de Pilotage de Ligne de Production (PLP), de mécanicien, logistique, gestion, etc. Sur cette période de trois ans, les élèves doivent réaliser au moins vingt-deux semaines de stage en entreprise. Cela implique une gestion rigoureuse de la répartition du temps par les équipes enseignantes entre le temps en entreprise et le temps dans l'établissement de formation. Dans les lycées, les cours sont divisés en sessions théoriques et sessions pratiques. Les travaux pratiques (TP) sont réalisés sur un plateau technique qui correspond à une zone dans le lycée où des équipements de formations sont à disposition des élèves.

Chaque diplôme de Bac professionnel est décrit par un document officiel appelé « référentiel de formation ». Chaque document de ce type explicite les différentes compétences à travailler pendant ces deux à trois années de formation. Les types d'examens sont aussi décrits dans ce document et également les différentes matières avec les coefficients respectifs. L'objectif est d'avoir un diplôme aux exigences identiques, quel que soit l'emplacement en France. Les référentiels sont réformés généralement tous les cinq ans, des exceptions peuvent néanmoins exister, comme le Bac Pro Commerce qui a été rénové pour la rentrée de 2019 alors que l'ancien document avait

1. Baccalauréat 2019, Ministère de l'Éducation Nationale : <https://www.education.gouv.fr/cid142775/baccalaureat-tout-savoir-sur-la-session-2019.html>

2. La voie professionnelle au lycée, Ministère de l'Éducation Nationale : <https://www.education.gouv.fr/cid2573/la-voie-professionnelle-au-lycee.html>

été mis en place pour la rentrée de 2004. Ces mises à jour des documents officiels visent à inscrire plus durablement les diplômés dans le contexte du monde du travail, car les métiers évoluent, et par conséquent il faut que les offres de formations suivent ces changements. Ces référentiels existent aussi pour les filières générales, néanmoins, dans l'enseignement professionnel, une grande partie des compétences sont travaillées pendant les sessions de travaux pratiques sur les plateaux techniques. C'est-à-dire que ce travail de formation dépend fortement des différentes maquettes pédagogiques présentes dans les lycées. Par exemple dans les lycées dispensant des formations industrielles, on retrouve sur les plateaux techniques des machines industrielles. Dans le cas d'une formation sur les métiers du commerce et de la vente, des magasins pédagogiques sont mis en place. Les zones de TP sont assez grandes et par conséquent les enseignants doivent être capables de gérer une classe répartie sur une large zone. Le temps passé en TP est important et il est donc nécessaire pour les lycées de disposer d'équipements adéquats pour les formations dispensées. Or la capacité à s'équiper et à renouveler les supports de formation varie selon les établissements, ce qui impacte directement la qualité de la formation dispensée. Les référentiels de diplômés n'indiquent pas explicitement les équipements à utiliser, laissant le choix aux établissements des produits à acquérir pour former les apprenants.

L'équipement utilisé a une influence sur la qualité des formations, nous pouvons citer à ce propos plusieurs caractéristiques importantes :

- **Compatibilité** : Le matériel doit être adapté à un usage pédagogique. C'est-à-dire qu'il doit prendre en compte les erreurs potentielles des apprenants ainsi que des utilisations non conformes.
- **Disponibilité** : Le matériel doit être disponible lors des sessions de TP. Si une machine est en maintenance ou est déjà utilisée par une autre classe, alors la session de travaux pratiques se retrouve impactée.
- **Similarité au monde industriel** : Afin de pouvoir travailler des compétences mobilisables dans le monde industriel, il est nécessaire d'utiliser des équipements qui soient sensiblement similaires à ce que l'on peut trouver dans le bassin industriel ciblé par la formation. Il y a donc un impératif de mise à jour des

équipements.

- **Diversité** : Pour se préparer au mieux aux métiers industriels, il est approprié que les apprenants puissent expérimenter dans divers contextes. Dans l'optique de travailler l'autonomie et l'adaptabilité des élèves aux situations professionnelles emblématiques, les apprenants doivent pouvoir mobiliser les mêmes compétences dans des situations diverses.
- **Sécurité** : Dans un contexte de formation, les apprenants vont faire des erreurs. Cela fait partie du processus de formation. Cependant, le formateur ne peut pas surveiller l'ensemble de la classe, qui se trouve généralement dispersée sur l'ensemble du plateau technique. Dans ce cas, il faut que les équipements puissent garantir un degré de sécurité très élevé afin d'éviter les risques pour l'apprenant et les maquettes pédagogiques.

1.1.3 Les problèmes de l'enseignement professionnel

Les organismes de formation professionnelle doivent investir régulièrement dans de l'équipement, que ce soit pour de la mise à jour de formations ou pour de nouvelles acquisitions à la suite d'une nouvelle réforme. Il est possible que les maquettes existantes soient adaptées aux nouveaux référentiels, mais dans d'autres cas, il faut innover et investir dans de nouvelles maquettes pédagogiques. Ce besoin implique des moyens financiers importants. Même si les régions contribuent au financement de ces équipements, tous les lycées n'arrivent pas forcément à les financer. Cela a un impact direct sur les achats de système complexe tel que des lignes de productions comme la figure 1.1a. Le manque d'équipements à jour peut conduire les apprenants à ne pas travailler certaines compétences alors qu'elles sont explicitement indiquées comme nécessaires par le référentiel de diplôme. Par exemple dans la filière commerce, un magasin pédagogique trop petit ou pas assez complet et réaliste peut desservir les étudiants qui doivent s'exercer à la mise en avant d'une nouvelle promotion. À la fin de leur cursus respectif, deux étudiants vont obtenir le même diplôme, mais ne seront pas forcément aussi compétents sur certaines tâches. Ce point peut être problématique pour un industriel souhaitant embaucher, qui devra sûrement investir dans de la

formation en interne pour faire apprendre au nouveau diplômé des choses qu'il était censé voir au cours de son cursus scolaire. Finalement dans cet exemple, nous avons deux jeunes disposant du même diplôme, mais à l'employabilité différente.

L'utilisation de maquettes en elles-mêmes peut poser des problèmes tant pour les concepteurs que pour les enseignants. En effet, il faut garder ligne de vue que ces équipements servent avant tout à la formation, les élèves vont donc faire des erreurs de manipulation ou de réglages. Il s'agit là de quelque chose de tout à fait normal dans un processus d'apprentissage, surtout dans une approche d'apprentissage par l'erreur. Il faut néanmoins que les maquettes soient capables de par leur conception de « résister » aux erreurs potentielles. Si la maquette tombe en panne après un premier TP à cause d'une mauvaise manipulation, cela ne convient pas aux enseignants, qui doivent alors improviser et changer le planning des TP. Pour le concepteur, cela implique une vision globale de la pédagogie et des erreurs potentielles pouvant endommager le système. Par exemple sur une fardeleuse (Figure 1.1b), des sondes de températures sont rajoutées de manière à pouvoir contrôler un mauvais réglage de la température du four ou alors un problème sur le convoyeur. En conditions réelles, les conducteurs de lignes sont formés et savent faire face à ce genre de situation. Alors qu'un élève de seconde est moins préparé à ce genre de cas. Les modifications apportées sont également à propos de la sécurité, majoritairement grâce à des processus de cartérisation des machines. Par exemple, l'industriel qui conçoit la maquette pédagogique peut mettre en place une barrière matérielle supplémentaire afin de ne pas mettre en danger les apprenants. Ces modifications complexifient parfois les systèmes, ce qui a pour effet de rendre la conception plus compliquée de même que la formation des enseignants, qui peuvent être familiers avec les équivalents industriels sans ces ajouts supplémentaires. Pour certaines maquettes, comme les lignes de productions pédagogiques, la surprésence de sécurités peut avoir un impact négatif sur la formation, car l'élève va pratiquer dans un environnement contrôlé quasiment sans risques et cela limite la sensibilisation des jeunes sur certains risques liés à l'utilisation de ces équipements. En conditions réelles, le jeune diplômé n'aura pas acquis de façon automatique l'ensemble des règles de sécurité et cela peut mener à des accidents du travail dans certains cas. C'est pourquoi dans certains diplômes, des compétences liées à la sécurité et la prévention des risques sont travaillées³. Par ailleurs, en stage, les professionnels donnent

3. <https://ent2d.ac-bordeaux.fr/disciplines/chaudronnerie/wp-content/uploads/sites/>

de moins en moins de tâches à risques, comme les activités électriques, afin d'éviter les risques pour le stagiaire. Cela limite pour l'apprenant la quantité de connaissances travaillées sur des cas concrets qu'il sera très probablement amené à voir lors de sa vie professionnelle. Les maquettes sont très utiles de par l'aspect tangible proposé de même que les manipulations possibles, néanmoins l'aspect scénarisation est très peu présent sauf dans le cas de maquettes adaptées comme une ligne de production où des cadences sont scénarisées. Le numérique peut combler les lacunes précédemment citées en proposant des outils sécurisés avec des scénarios complets et modulables.

1.1.4 Modernisation des enseignements

Depuis quelques années, le numérique s'implante de plus en plus dans l'industrie, si bien que le terme d'Industrie 4.0 est utilisé pour désigner l'utilisation de technologies au service des méthodes de productions. Par exemple, cela peut être l'interconnexion des postes de production pour améliorer les cadences, ou encore, l'utilisation de technologies telles que la Réalité Augmentée ou Virtuelle pour assister un opérateur sur une ligne de production ou aider à la conception de nouveaux produits⁴. Pour pouvoir suivre ces changements parfois radicaux, le monde de la formation professionnelle doit être capable de s'adapter et de proposer des formations qui sont compatibles avec ces changements dans l'industrie.

L'EN souhaite depuis plusieurs années enclencher une transition numérique de l'enseignement (Becchetti-Bizot, 2017). L'Académie de Nantes souhaite être actrice sur cette transition voulue par les gouvernements successifs et a mobilisé des moyens pour mener à bien cette transition en investissant par exemple dans des CAVE⁵, des tablettes, ordinateurs portables. La mise en place de salles informatiques et d'autres outils techniques ont permis de former progressivement les enseignants à l'utilisation des nouveaux outils numériques (plus généralement appelés Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Enseignement, TICE) (Rebel et Gomez de

23/2018/06/Former-à-la-sécurité-livret-enseignant-v3.pdf

4. <https://www.usine-digitale.fr/article/plongee-dans-les-coulisses-de-renault-pionnier-de-la-r>
N523349

5. Dispositifs de RV détaillés dans le chapitre trois de ce manuscrit

Segura, 2010) et ont contribué à la modernisation des méthodes d'apprentissages. En plus des moyens de formations, de nouveaux supports de gestion des enseignements sont à disposition des enseignants, notamment les Learning Management System (LMS) tels que Moodle, CerisePro, 360Learning, Claroline. Il s'agit de logiciels qui peuvent gérer les différents parcours des élèves et proposent d'autres fonctionnalités telles qu'un accès distant, des modules d'auto-évaluation, ou encore la gestion de ressources pédagogiques. Le numérique peut aussi aider à garantir un accès aux enseignements lorsqu'il est impossible de se rendre physiquement dans les établissements scolaires, comme lors de la pandémie de Covid-19 de 2020. Le numérique, et plus généralement la technologie, sert d'accompagnement pour les élèves et joue un rôle de facilitateur des interactions entre l'enseignant et l'élève (Becchetti-Bizot, 2017).

Les avancées de l'Industrie 4.0 doivent être transposées dans les centres de formation, et cela passe par une modernisation des équipements et des approches développées tant en travaux pratiques qu'en classe « classique ». Dans ces travaux de thèse, nous avons étudié la conception et la mise en place de solutions numériques fonctionnant en complément de l'offre de formation actuelle dans les établissements. En effet, les jeunes diplômés doivent être mobilisables rapidement pour convenir aux besoins rapides des entreprises. Ces jeunes doivent être versatiles et capables de s'adapter à l'évolution rapide des postes de travail. Or dans les centres de formation, les équipements parfois anciens ne conviennent pas forcément à former efficacement ces jeunes. Comme nous l'avons vu précédemment dans cette introduction, tous les établissements ne sont pas égaux en termes de moyens et de diversité d'équipements. Nous nous sommes donc intéressés à l'utilisation de nouvelles techniques de formation complémentaire qui viennent compléter l'offre de formation existante dans les établissements professionnels, comme la RV.

1.2 Cadre technologique

1.2.1 La Réalité Virtuelle

Dans le cadre de ces travaux de recherche, nous avons utilisé les technologies de la RV. Dans le milieu de l'éducation, les professionnels de la pédagogie peuvent utili-

ser le terme de Réalité Virtuelle Immersive (RVI) pour faire la distinction entre la RV classique et une utilisation plus orientée didactique avec des dispositifs plus immersifs tels que casques de RV ou CAVE. La RV regroupe les techniques informatiques qui simulent des environnements immersifs. Ces situations sont reproduites à l'aide de dispositifs qui mobilisent des expériences sensorielles à l'aide de retours, visuels, sonores, voire haptiques. La notion d'immersion sera exprimée dans l'état de l'art, car la définition de ce terme peut encore faire débat de nos jours.

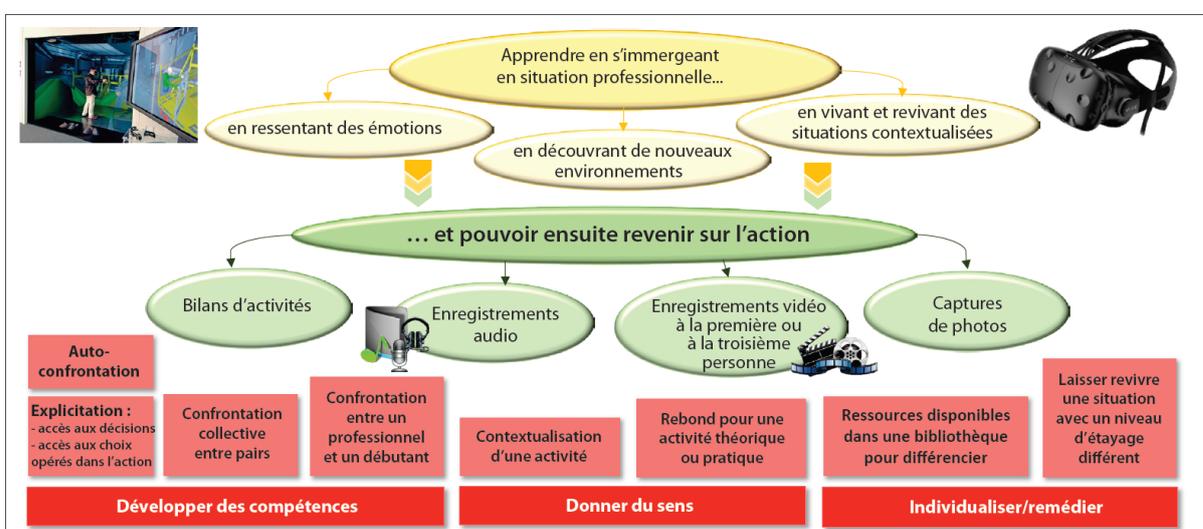


FIGURE 1.3 – Les ressorts de la RV selon Radigois (2018).

Les enseignants ont vu dans la RV une opportunité pour mettre en place des situations de formations qui demandent une scénarisation complexe, telles qu'une habilitation électrique ou alors des activités qui sont difficiles à mettre en place sur les plateaux techniques. Notamment en raison d'un manque d'équipements, de place ou de contraintes de sécurité à prendre en compte. Cette technologie sert aussi de moyen efficace de projection dans le réel où l'apprenant peut être mis en immersion dans un environnement réaliste qui correspond au métier ciblé par la situation virtuelle. Par exemple pour un pilote de ligne de production, cela peut être un espace de conditionnement dans une usine. Cela rajoute de la pertinence à des aléas potentiels et cela permet également de sortir de la routine du simple exercice sur le plateau technique du lycée. La RV est aussi perçue comme étant un nouveau lieu de formation (Radigois, 2018) propice à l'innovation pédagogique grâce aux nouvelles méthodes de travail que

cela implique (Figure 1.3), comme l'exploitation pédagogique d'une vidéo issue de la situation virtuelle, ou encore une explicitation en temps réel du reste de la classe à propos de ce que l'élève en immersion est en train de réaliser. Il s'agit d'une approche complémentaire des maquettes pédagogiques. Par exemple, nous allons détailler plus loin dans ce manuscrit le processus de transcription en RV d'une ligne de production (Figure 1.4) qui est utilisée sur les plateaux techniques ainsi que les utilisations possibles sur le terrain avec les enseignants.



FIGURE 1.4 – Virtualisation d'une ligne de production.

1.2.2 Considérations du terrain

Ainsi, ce sujet de thèse n'est pas focalisé intégralement sur la partie informatique des outils numériques. En effet, la réalité du terrain ainsi que la finalité pédagogique impliquent de considérer les enseignants et de comprendre leurs métiers, attentes et besoins. Dans ce contexte, il est à noter que les utilisations potentielles de la RV restent encore floues pour certains enseignants. De plus, cette technologie peut engendrer de la méfiance de la part des équipes pédagogiques, qui peuvent craindre la disparition des maquettes pédagogiques réelles au profit de supports uniquement numériques. Ceci a été constaté lors des tests dans les lycées que nous avons effectués, en re-

vanche cette réticence n'est pas seulement inhérente à la RV, mais à l'ensemble des nouvelles technologies (Hodas, 1996).

Depuis quelques années, les équipes enseignantes sont conscientes qu'il faut appréhender une application de RV sur le fond et non sur la forme de son implémentation. Numériser une maquette pédagogique et reproduire son comportement ne demande pas d'efforts considérables d'un point de vue technique. Cependant il existe les mêmes contraintes pour le numérique que pour les maquettes pédagogiques, à savoir, comment exploiter l'outil convenablement pour pouvoir l'utiliser en formation professionnelle ? L'intérêt du numérique est bien compris pour les enseignants sur la forme, mais sur le fond des interrogations justifiées subsistent, comme :

- La multiplicité d'effets visuels est-elle justifiée d'un point de vue pédagogique ?
- Le système doit-il produire une évaluation automatique ?
- Comment exploiter un tel outil au sein de la classe ?
- Est-ce vraiment pertinent de mimer la réalité alors que nous disposons d'un outil (virtuel) qui peut permettre de faire bien plus ?

Il y a donc un travail conséquent à apporter en plus de la simple digitalisation des moyens techniques réels tels que les maquettes ou procédures. Il faut, en plus de proposer une expérience immersive contextualisée, proposer du contenu pédagogique pertinent, tant pour l'enseignant que pour l'apprenant. Nous allons développer cela dans les prochains chapitres de ce manuscrit.

1.2.3 Objectifs de la thèse

Les objectifs de cette thèse sont multiples et peuvent être catégorisés en trois parties distinctes.

1. Proposer des méthodes de création de scénarios virtuels, basées sur les ex-

périences des enseignants ainsi que sur les référentiels de diplôme de l'EN. La mise en place d'une méthodologie appliquée au contexte de la formation professionnelle est une priorité, car cela permet de concevoir de manière plus précise les cahiers des charges pour le développement d'applicatifs virtuels. Dans cette partie il faut aussi prendre en compte les différentes filières, car chaque domaine de formation possède ses propres spécificités et approches de réflexion. Cela contraint donc la mise en place d'une approche générique au profit d'approches contextuelles qui seront utilisées en fonction des conditions d'écriture des scénarios virtuels. Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes intéressés aux diplômes de bac professionnel Métiers de l'Électricité et de ses Environnements Connectés (MELEC), Pilotage de ligne de production (PLP) et Commerce/Vente.

2. Mettre en place des modules informatiques génériques permettant aux développeurs de mutualiser les interactions 3D ainsi que de proposer des fonctionnalités compatibles avec les différentes approches pédagogiques utilisées dans les lycées. Une attention particulière a été faite sur l'étayage des interactions afin de pouvoir rendre les actions virtuelles le plus simples possible et pédagogiquement riches pour les élèves. L'approche générique du développement permet d'optimiser le temps de développement. Elle intervient aussi à l'étape d'écriture des scénarios en guidant le processus de réflexion. Une approche de développement générique aide également l'utilisateur final, qui aura à sa disposition les mêmes actions dans plusieurs contextes pédagogiques. Réduisant ainsi le temps d'apprentissage de l'outil au profit de la didactique.

3. Enfin, proposer des méthodes d'exploitations pédagogiques de ces outils numériques. Il faut que les outils développés puissent être à la fois utilisables par les élèves en contexte réel, mais aussi par les enseignants. L'utilisation de ces nouvelles technologies impose de repenser l'organisation de la classe ainsi que certaines interactions entre les enseignants et les élèves. De plus, en fonction des différents contextes de formation, les enseignants doivent être capables de moduler l'utilisation de l'outil afin de correspondre au mieux aux élèves et à la situation du centre de formation. Dans cette partie de la thèse, nous proposons donc différentes méthodes permettant aux enseignants d'exploiter pédagogi-

quement l'outil dans de bonnes conditions.

1.2.4 Éléments de problématique

Cette thèse s'articule également en trois axes principaux, tous font suite à des problèmes rencontrés sur le terrain lors de la création de situations virtuelles de formations avec les enseignants. Ces verrous sont à la fois, techniques, pédagogiques et organisationnels et mettre de côté l'un d'entre eux peut compromettre la conception globale de la situation de formation. En effet, depuis plusieurs années les enseignants ont fait remonter à DEC Industrie des informations à propos de la difficulté d'enclencher la transition vers le numérique dans certains lycées. Par exemple, simuler de la prise de décision sur l'organisation d'une ligne de production n'est pas réalisable alors qu'un pilote de ligne doit être capable de faire face à des aléas de production qui vont venir impacter directement les résultats de productions. Vis-à-vis de l'utilisation du numérique dans les enseignements, les enseignants nous ont indiqué la difficulté de trouver des solutions qui correspondent à leurs besoins pédagogiques. Ils constatent le manque d'efforts des industriels du numérique apportés au contenu pédagogique, au profit des éléments visuels et interactifs qui n'ont pour l'enseignant que peu d'intérêt. Il convient donc pour la partie numérique de proposer des approches de conception et d'utilisation qui puissent être pertinentes pédagogiquement.

De concert avec les enseignants, des projets de numérisation de situations emblématiques ont pu voir le jour. Cependant, contrairement aux approches classiques de gestion de projet informatique et de conception de maquettes pédagogiques, des difficultés de conduite de projet subsistent. En effet, pour numériser une situation professionnelle, il faut, en plus des compétences en informatique et en modélisation, avoir des notions avancées dans le métier ciblé. Par exemple, une activité pédagogique pour le Bac Pro Commerce demande des connaissances dans ce domaine, or dans notre cas, nous avons plus le point de vue du client faisant ses courses que celui du professionnel dans les métiers de la vente. C'est pourquoi il est risqué de commencer la conception sans avoir écrit au préalable un scénario précis et explicite avec les enseignants, professionnels et inspecteurs académiques. La scénarisation comporte le déroulé de l'activité pédagogique, mais également les variantes à inclure, le

comportement des interactions ou encore les modalités d'exploitation pédagogiques. Cette première étape constitue un verrou majeur dans le sens où elle va déterminer les directions à suivre pour la suite du projet. Les méthodologies agiles classiques de conduite de réunion ne suffisent pas pour l'écriture d'un scénario pédagogique, car les protagonistes ont des profils trop éloignés, et peuvent ne pas se comprendre. Le temps alloué à la réflexion peut être conséquent. Grâce à nos échanges avec des enseignants de différentes sections, nous avons aussi constaté que les approches de conception d'un scénario changent en fonction du domaine avec des degrés d'efficacité différents. Nous nous sommes donc intéressés à la mise en place de méthodes permettant de transcrire une activité pédagogique en contenu numérique tout en considérant les contraintes de chacun (emploi du temps, attentes pédagogiques, organisation de la classe, liens avec les référentiels).

Nous avons pu expérimenter la conduite de plusieurs projets pour des filières différentes, qui sont par moments similaires en certains points. Des interactions en RV peuvent être utilisées dans plusieurs projets, c'est alors qu'un choix de développement générique s'est présenté. L'intérêt de procéder de la sorte c'est de pouvoir capitaliser les développements de manière à être de plus en plus réactifs sur les différents projets. En effet, dans l'EN, les contraintes d'emploi du temps et de livraisons dépendent du calendrier scolaire, ce qui implique peu de flexibilité. Gagner du temps de développement semble donc être une évidence, mais la mise en place d'une telle approche générique demande de la rigueur, notamment vis-à-vis de l'organisation du code et de la classification des interactions virtuelles. Suivant la taille du projet, il peut ne pas être pertinent d'inclure toutes les interactions, c'est pourquoi il faut réfléchir en amont à la structure du code de manière à rendre chaque « brique logicielle » indépendante et flexible suivant les besoins. Cette contrainte est d'autant plus valable pour les développements sur les plateformes mobiles où la taille de l'applicatif est restreint. Par ailleurs, le public ciblé pour les applications de RV peut influencer le développement informatique et les interactions virtuelles. Par conséquent, il est approprié de considérer le profil des apprenants, sans quoi, il est possible de tomber dans les travers des jeux vidéo et de promouvoir l'aspect ludique au détriment l'aspect pédagogique (Fabola et Miller, 2016). C'est là toute la difficulté de ce genre de projet de RV où le développeur est tenté d'appliquer les codes des jeux vidéo alors que l'enseignant, lui, souhaite s'orienter vers la pédagogie. À cela vient s'ajouter la nécessité de pro-

céder à un étayage des interactions. En effet, dans certains métiers, les procédures sont parfois complexes et requièrent une gestuelle précise. Il se pose alors la question du degré de réalisme à appliquer dans l'application virtuelle. Mimer intégralement la réalité rendrait la tâche irréalisable tant pour l'élève que pour la conception. Alors que trop simplifier la procédure peut enlever des éléments pédagogiques essentiels. C'est pourquoi la conception d'une procédure virtuelle ne mobilise pas uniquement le développeur, mais également les enseignants et professionnels des métiers qui doivent contribuer à assister la conception pédagogique. Par exemple, une procédure de soudage de fibre optique requiert une gestuelle précise et des actions sur des éléments fragiles et petits. Il faut donc procéder à des simplifications comme la mise en place d'animations automatiques qui vont remplacer la gestuelle trop fine pour le système virtuel. Il faut aussi garder à l'esprit que la RV est un complément aux maquettes physiques classiques, c'est-à-dire que si la gestuelle n'est pas travaillée en virtuel, elle peut l'être en réel. Cette étape de transformation du réel vers le virtuel est un quelque chose de complexe qui peut donner un temps de développement allant du simple au double. Nous tenterons de répondre à ces contraintes de développement et de conception des interactions dans le chapitre trois et quatre de ce manuscrit.

Le dernier axe de problématique de cette thèse réside dans l'exploitation pédagogique des outils numériques, et plus précisément de la RV. Il s'agit là d'éléments critiques qui impactent directement l'utilisation du numérique dans les salles de classe. Ces interrogations viennent des enseignants, qui trouvent la technologie au point et comportant un fort potentiel. Cependant, se pose la question de l'exploitation pédagogique, c'est-à-dire, « *Comment utiliser l'outil au sein d'une classe ?* », « *Comment adapter le contenu et l'évaluation aux différents profils d'élèves au sein d'une classe ?* » ou encore, « *Comment intégrer ce nouvel outil qu'est la RV dans les cursus existants ?* ». Avec une approche par compétences⁶ le système peut difficilement donner automatiquement une note après une activité virtuelle. D'une part en raison de la complexité que cela sous-entend et d'autre part, car ce n'est pas un souhait des inspecteurs académiques que d'avoir une machine qui donne en sortie une sorte de ticket avec une note. Comme sur les plateaux techniques, les enseignants veulent des indicateurs de performance de manière à pouvoir faire le parallèle entre la RV et le référentiel de diplôme ainsi que pour faciliter l'intégration de cette technologie dans le cursus sco-

6. Cette notion sera détaillée dans le prochain chapitre.

laire. Pour mener cela à bien, il faut avoir une situation virtuelle qui soit flexible et sur laquelle l'enseignant puisse avoir la main pour adapter le contexte pédagogique (Jensen et Konradsen, 2018). Pour un développeur, il peut donc être tentant de mettre en place un paramétrage technique impliquant des langages de programmation tels que le XML ou encore une approche avec de l'UML ou des EML (*Educational Modeling Language*). Cependant, pour un enseignant de lycée professionnel, maîtriser de tels langages est compliqué de par les compétences que cela implique et aussi par l'investissement temporel à mettre en place, d'autant plus que le temps alloué au numérique est relativement faible par rapport aux autres activités. Il convient donc de mettre en place des systèmes permettant aux enseignants de venir agir sur le scénario sans compétences précises en informatique. Pour ce faire, cela doit être pensé et explicité lors des premiers instants de la conception pédagogique.

Dans le cadre de nos travaux de thèse, nous proposons alors une méthode de conception d'EV pour la formation professionnelle dans les lycées qui soit transposable aux exigences du contexte scolaire aussi bien en termes de moyen, comme l'espace physique disponible, qu'en termes de pédagogie.

1.2.5 Plan du manuscrit

Le manuscrit est divisé en six chapitres. La première partie correspond à l'état de l'art, qui est constitué de deux chapitres. Le premier est focalisé sur les différentes approches pratiques et théoriques de la conception informatique appliquée à la réalité virtuelle. Le second chapitre de l'état de l'art porte sur la pédagogie et les EIAH.

Dans les chapitres quatre et cinq, nous nous questionnons sur les différentes manières d'interagir dans un EV appliqué à la formation professionnelle ainsi que les différentes méthodes d'introduire une nouvelle interaction virtuelle à un apprenant novice. Nous proposons plusieurs approches de conception et d'utilisation pour les différents intervenants du projet de recherche :

- **Concepteur** (ce terme regroupe les développeurs et infographistes) : Nous nous sommes intéressés aux différentes approches génériques permettant de gagner du temps de développement. De mêmes qu'aux différentes méthodo-

logies à mettre en place pour concevoir des interactions compatibles avec une utilisation pédagogique.

- **Apprenant** : Nous nous sommes intéressés aux interactions et comment les introduire aux élèves sans surcharger ces derniers d'informations superflues de manière qu'ils se concentrent sur la partie pédagogique et non sur l'outil en lui-même. Il y a aussi dans ces travaux une forte implication dans la recherche de méthodes d'exploitation pédagogique en dehors de la réalité virtuelle. Compte tenu du profil des élèves, nous avons aussi pris soin de dimensionner les interactions pour maximiser l'impact pédagogique.
- **Enseignant** : Nous souhaitons mettre l'enseignant au centre du système de formation en tant que pilote. Il pilote l'écriture du scénario, la préparation des sessions virtuelles ainsi que l'exploitation pédagogique de ces dernières. Nous proposons donc diverses méthodes informatiques permettant à l'enseignant de mener à bien ces différentes missions. L'objectif est de rendre les enseignants autonomes et capables d'adapter l'outil virtuel à leurs besoins sans l'aide d'un référent technique.

Le chapitre six expose les différentes implémentations et expérimentations qui ont été mises en place pendant cette thèse pour valider nos hypothèses et choix techniques. De même que divers tests menés, dans des lycées professionnels, nous permettant de nous assurer de la bonne compatibilité de nos approches avec la réalité du terrain. Les résultats de ces expérimentations sont par la suite discutés en fin de chapitre. Nous terminons ce manuscrit par une conclusion et une discussion à propos des perspectives et des nouvelles voies de recherche que cette thèse a ouverte.

PREMIÈRE PARTIE

État de l'art

APPROCHES POUR LA FORMATION PROFESSIONNELLE

Ces travaux de thèse visent à appliquer des techniques de RV au service de la formation professionnelle. Nous nous devons donc de poser les bases théoriques de la didactique professionnelle ainsi que d'analyser des pratiques d'enseignements de filières professionnelles. L'objectif de ce chapitre est d'introduire les éléments permettant de faire le lien entre la partie conception informatique pure et la partie pédagogique qui est, finalement, l'élément le plus important lorsque l'on souhaite utiliser la RV en contexte de formation professionnelle. Certains éléments détaillés dans ce chapitre correspondent à des sujets qui ont fait l'objet de multiples thèses. Nous n'avons donc pas ici la prétention d'étudier l'intégralité de ces domaines, mais d'en sélectionner les parties les plus pertinentes pour nos travaux de recherche. Nous allons commencer par proposer une définition de la didactique professionnelle ainsi qu'une description des méthodes existantes pour la mettre en place et évaluer les compétences des apprenants. Puis nous détaillons les utilisations du numérique dans un cadre de formation professionnelle dans la littérature. Les situations pédagogiques suivent des procédures que les apprenants doivent suivre, c'est pourquoi nous nous intéressons également à la notion de scénario pédagogique.

2.1 La didactique professionnelle

2.1.1 Définitions

Dans cette thèse, nous nous intéressons aux situations professionnelles emblématiques impliquant le concept de la **didactique professionnelle**. Selon Pastré (2002), « *elle a pour but d'analyser le travail en vue de la formation des compétences* ». L'analyse

du travail en didactique professionnelle répond à la fois à l'objectif de « *construction des contenus de formation correspondant à la situation de référence* » et « *d'utiliser les situations de travail comme des supports* » pour la formation des compétences (Pastré, 2002). Dans notre cas d'étude, nous avons pu constater sur le terrain la difficulté des formateurs à construire des contenus de formation qui correspondent aux métiers étudiés ainsi qu'à reproduire les situations professionnelles au sein des plateaux techniques. Cela complexifie la mise en œuvre des dispositifs didactiques au sein des établissements. L'analyse du travail en didactique professionnelle est organisée autour de trois courants théoriques à savoir **la psychologie du développement**, **l'ergonomie cognitive** et **la didactique** (Pastré *et al.*, 2006). Cette dernière met en relation la dimension théorique et opératoire du travail. La théorie et l'application de cette dernière, en conditions réelles, doivent être capables de cohabiter pour permettre une situation de formation pertinente pour l'apprenant. Plus précisément, dans les filières professionnelles et techniques, la théorie (cours magistraux en classe) doit être accompagnée de mises en pratique (travaux pratiques). Par exemple, après avoir eu un cours théorique sur la gestion d'un réseau de fibre optique, les apprenants peuvent utiliser des maquettes pédagogiques pour appliquer ces connaissances théoriques en pratique.

Le terme seul de didactique correspond à l'étude des pratiques d'enseignement. Différents concepts sont mis en relation avec la didactique, comme le **constructivisme**, défini par Jean Piaget, qui explique que chaque individu possède sa propre représentation de la réalité. De ce fait, la construction et la représentation des savoirs pratiques et expérientiels sont propres à chaque individu. C'est pour cela que les adeptes de l'approche constructiviste ne considèrent pas la transmission des connaissances comme étant un simple « *copier-coller* » du savoir d'un individu vers un autre, mais plutôt comme une succession de construction de savoirs, basée sur l'expérience propre des individus ainsi que des démonstrations de non-viabilité des savoirs précédents (Pépin, 1994). Les différents processus d'apprentissage s'effectuent tout au long de l'existence des individus, au gré de constructions et de déconstructions des savoirs. Pépin (1994) explique dans son article que « *les élèves ne sont pas incapables d'apprendre ni lents à le faire ; ils connaissent autre chose qui est plus ou moins compatible ou conflictuel avec ce qu'on voudrait leur enseigner* ». En effet, les savoirs pratiques étant construits progressivement, plus ils sont anciens et solidement ancrés, plus le

processus de déconstruction sera compliqué. Par exemple, lors de la mise en place de nouvelles postures de travail, il peut être compliqué de démontrer l'utilité de la nouvelle méthode auprès d'un professionnel ayant plusieurs décennies d'expérience, que pour une personne nouvellement diplômée ou un apprenant en formation initiale.

L'apprentissage par résolution de problèmes (Pochet, 1995) ou méthode essai-erreur est un autre concept important de la didactique professionnelle. Il s'agit de proposer à un élève une situation concrète qu'il ne connaît pas et qu'il doit résoudre. Cet exercice peut être réalisé seul ou en groupe, de manière à stimuler la mobilisation des savoirs et compétences pour mener à bien la correction du problème posé. Cette approche est intéressante, surtout dans le milieu de la formation professionnelle, car cela permet d'amener de nouveaux concepts grâce à des problèmes contextualisés (Galand *et al.*, 2008) et proches du monde professionnel, comme les maquettes pédagogiques sur les plateaux techniques. Il s'agit aussi d'un mécanisme pertinent pour l'autoformation des apprenants grâce à la dynamique de groupe et au travail collaboratif nécessaire pour résoudre le problème (Galand *et al.*, 2008). Les résultats obtenus par Galand *et al.* (2008) dans leur expérimentation auprès d'étudiants, soulignent l'importance pour l'apprenant de faire le lien entre le contenu du cours théorique et les applications concrètes de ces éléments théoriques.

2.1.2 Approche par compétences

La didactique professionnelle manipule des notions telles que les savoirs ou les compétences. De plus, dans le système éducatif français, et plus particulièrement dans l'enseignement professionnel, l'approche dite « par compétences » est privilégiée à l'approche « par les savoirs ». La notion de compétence est suffisamment ouverte pour permettre à chacun d'interpréter cela de manière différente. Par exemple les professionnels sur le terrain considèrent la compétence comme étant les habiletés à mener à bien une tâche spécifique. En formation, ces habiletés peuvent être travaillées grâce à l'utilisation de maquettes pédagogiques.

Les savoirs sont équivalents aux connaissances, et selon (Paquette, 2002a) une compétence est une combinaison de **savoirs**, **d'habiletés** (savoir-faire) et **d'attitudes**

(savoir-être). Les savoirs et savoir-faire peuvent être théoriques ou opérationnels, et le développement de ces deux éléments peut être effectué sur un processus à plus court terme que les savoir-être qui relèvent plutôt d'un processus plus long (George, 2011). Ces attitudes vont venir piloter l'utilisation de connaissances précises, et elles sont construites en mettant l'apprenant en situation. C'est pourquoi la qualité des mises en situation est cruciale au bon développement des compétences. Les savoir-être sont également mobilisables dans plusieurs situations professionnelles, ils contribuent à une transférabilité efficace des compétences d'un contexte donné vers un autre. Paquette (2002b) propose une représentation des compétences en utilisant le formalisme MOT (*Modélisation par Objets Typés*). Cette approche utilise quatre types de connaissances : les faits, les concepts, les principes et les procédures. Grâce à cette représentation, l'auteur a pu mettre en place une métareprésentation d'une compétence (Figure 2.1). L'auteur explique que lorsque l'on décrit une compétence sur un individu précis, il faut considérer, en plus de la compétence en elle-même, le contexte qui y est associé, comme le contexte **cognitif** et **social** de la personne. Selon nous il s'agit de deux éléments essentiels dans un contexte d'éducation dans lesquels de fortes différences sociales peuvent être présentes, notamment en fonction des zones géographiques des établissements. De plus, ces inégalités peuvent être présentes au sein d'un même établissement. L'évaluation d'une compétence est donc à adapter quasiment au cas par cas.

Perrenoud (1995a) propose une approche plus cognitiviste de la compétence, c'est-à-dire un savoir-faire de haut niveau qui mobilise de nombreuses ressources cognitives. De plus, pour « *toute compétence de haut niveau est transversale au sens où elle mobilise des connaissances et des méthodes issues de plus d'une discipline* » (Perrenoud, 1995a). Cette transversalité est un élément de plus en plus pris en compte dans les établissements scolaires afin de rendre les apprenants polyvalents et facilement « insérable » dans le monde du travail qui est en constante évolution.

Cela veut dire qu'une compétence peut dépendre de plusieurs savoirs, mais également, qu'un savoir peut être impliqué dans plusieurs compétences. Perrenoud va plus loin dans la définition d'une compétence en distinguant deux niveaux de savoir-faire : un niveau bas et un niveau haut (Perrenoud, 1995b). Les savoir-faire de faible niveau mobilisent des savoirs limités et représentent donc généralement des tâches procé-

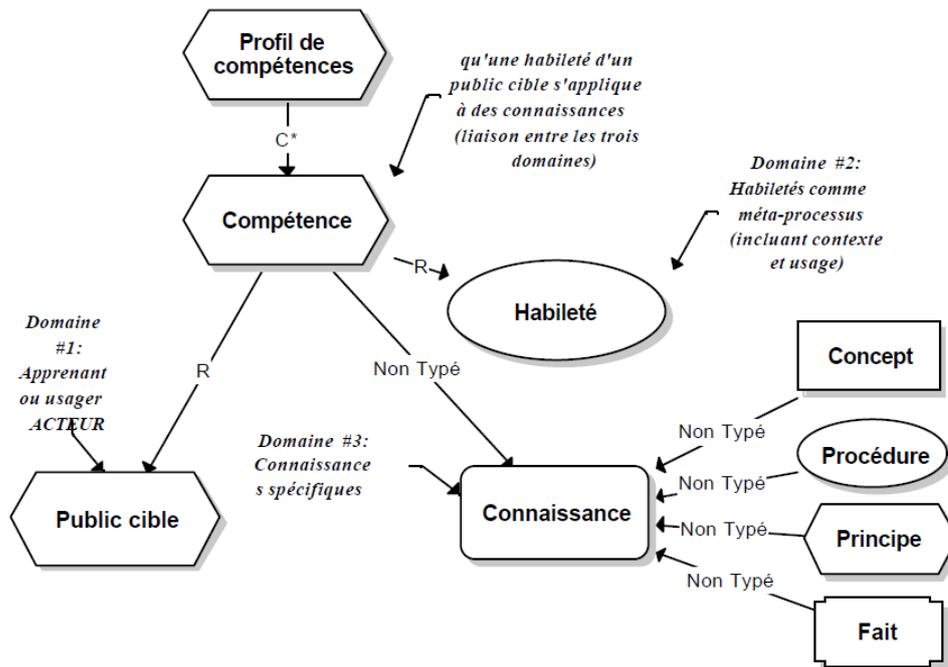


FIGURE 2.1 – Métareprésentation d'une compétence selon Paquette (2002a).

dures. Tandis que ceux de haut niveau peuvent s'apparenter aux compétences, car elles mobilisent plus de savoirs et requièrent des capacités d'abstraction ou de généralisation (Perrenoud, 1995b).

Une compétence est donc un ensemble de (1)**savoirs**, (2)**savoir-faire** de faibles et hauts niveaux et (3)**savoir-être**. Lorsqu'un apprenant utilise une compétence, il mobilise donc plusieurs savoirs pour résoudre un problème donné (Perrenoud, 1999). Lorsqu'elle est mobilisée de manière satisfaisante, une compétence permet donc de résoudre plus ou moins efficacement un problème donné (Carré et Pierre, 2000). L'approche par compétences privilégie les compétences plutôt que les savoirs seuls et prépare les élèves à des métiers spécifiques. Au fur et à mesure de leur pratique, ils enrichissent leurs compétences de nouveaux savoirs, notamment les savoir-être qui vont piloter une mobilisation plus efficace au fil du temps des connaissances de l'apprenant.

Dans le cas de nos travaux de doctorat, il est intéressant de distinguer les savoirs procéduraux de ceux qui s'apparentent plus à des compétences au sens décrit par

Perrenoud (1995b), car de ce fait, pour une approche de formation à l'aide de la RV, il peut être approprié de mettre en place un étayage sur les éléments plus procéduraux, au profit des savoir-faire de haut niveau, qui sont par définition plus complexes. Cela peut par exemple être le choix d'automatiser certaines tâches, comme dévisser automatiquement un élément dans le monde virtuel sans avoir à faire le geste complet. Nous détaillerons cette approche de simplification dans le chapitre quatre de ce manuscrit (sous-section 4.1.2).

2.1.3 Évaluation de la performance d'un apprenant

Lors de la mise en place d'une situation didactique, l'apprenant effectue un travail donné. Ce travail peut mener à une évaluation afin de contrôler l'état des connaissances ainsi que la maîtrise des habiletés. La démarche d'évaluation d'une compétence peut emprunter une approche formative pour accompagner les apprentissages puis une approche sommative afin de contrôler les acquis (Perrenoud, 2001). Ces processus d'évaluation existent sous différentes formes. Il y a bien entendu le classique examen ou contrôle sur table, néanmoins, dans les filières de la formation professionnelle, d'autres méthodes d'évaluation des performances sont utilisées pour juger des habiletés manuelles et procédurales. Comme nous venons de l'évoquer en introduction, ces filières comportent une grande quantité de travaux pratiques, stages (ou PFMP pour *Période de Formation en Milieu Professionnel*). Le contrôle classique des connaissances ne suffit pas à valider les compétences des apprenants, surtout dans le cas d'utilisation de matériel lors des TP. Par conséquent nous allons voir ici les méthodes d'évaluation les plus utilisées dans les centres de formation et discutées dans la littérature scientifique.

Tout d'abord, l'observation de l'activité pédagogique constitue une première méthode d'évaluation formative qui est régulièrement utilisée en contexte de formation professionnelle. Elle peut être qualifiée de *qualitative*. Il peut s'agir de l'observation d'une tâche manuelle pour corriger l'apprenant si sa gestuelle n'est pas convenable ou alors de l'observation de la mise en place d'une procédure comme le démarrage d'une machine industrielle. L'observation permet donc à un enseignant d'interagir directement et individuellement avec un apprenant. Lors de l'observation, l'enseignant

peut choisir d'interrompre l'apprenant ou alors de garder les remarques pour un temps d'échanges après l'activité. Comme le précise Philip (2005) pour qu'une observation soit formative, elle doit être suivie d'une *intervention*. L'observation n'est pas une activité passive, elle mobilise l'enseignant pendant que l'élève réalise son activité, pour qu'en sortie une évaluation de l'élève soit faite. L'enseignant aussi va utiliser les résultats de cette observation pour adapter son dispositif pédagogique (Philip, 2005).

D'autres méthodes d'évaluation sont mises en place dans les lycées professionnels, comme les méthodes de verbalisation, tels que les entretiens d'explicitation, explicités par Pierre Vermersch, résumé par Guigue-Durning (1996), la méthode de verbalisation simultanée (*Think aloud* aussi nommée verbalisation pendant la réalisation de l'activité (Cahour et Falzon, 1991)). Cette dernière consiste pour l'apprenant à expliquer ses actions pendant qu'il les réalise, alors que l'entretien d'explicitation se déroule après la session, où l'apprenant doit revenir oralement sur l'activité réalisée. L'entretien d'explicitation est une approche utilisée en formation professionnelle, qui fait appel au vécu de l'apprenant (Martinez, 1997), contrairement à la méthode de verbalisation simultanée, qui permet à un enseignant d'enrichir son observation en suivant la logique exprimée par l'élève. L'enseignant peut piloter l'entretien d'explicitation en posant des questions du type « *et si tu avais à refaire cet exercice ?* » ou encore des demandes d'explication sur une étape précise de la réalisation (Martinez, 1997). Dans ce manuscrit, nous allons détailler les méthodes d'explicitation utilisant des traces numériques issues des simulations virtuelles. Nous ferons aussi référence à ces entretiens d'explicitation en utilisant l'anglicisme, *debriefing*. Il est régulièrement utilisé dans des contextes de simulations pédagogiques médicales (Motola *et al.*, 2013; Roh *et al.*, 2016). Cette approche d'évaluation par *débriefing* peut également fonctionner de pair avec un entretien avant l'activité pédagogique, aussi appelé *briefing*.

L'intérêt de l'entretien d'explicitation pour les enseignants est de ne pas nécessiter de matériel particulier, seuls l'apprenant et l'enseignant sont impliqués dans la réalisation de l'entretien. Il est cependant possible d'améliorer la conduite de l'entretien à l'aide de données matérielles telles que des prises de notes, des diagrammes, des vidéos ou encore des photographies. Le fait de filmer une activité pour qu'ensuite ladite vidéo serve de support est une pratique déjà existante dans certains établissements. Néanmoins, cet exercice reste ponctuel pour des raisons de complexité de mise en

place et également à cause du temps que ces entretiens peuvent demander. En effet, il faut du matériel adapté pour filmer les activités, de même que former les apprenants à l'utilisation de ce matériel. Ensuite il faut prévoir un temps supplémentaire pour visionner à nouveau la vidéo en présence de l'apprenant et de l'enseignant. Or ces instants ne sont pas nécessairement prévus dans les emplois du temps et dans l'organisation même de la classe.

2.1.4 La simulation comme support d'apprentissage et d'évaluation

Dans le domaine de la formation, le terme de simulation intervient régulièrement. La simulation est le fait de copier ou d'imiter un modèle réel selon différents degrés de fidélité, dans l'objectif d'améliorer les savoirs et les compétences, de même que les habiletés des utilisateurs. Dans la formation, la simulation est synonyme de mise en pratique et permet aux apprenants de mettre en œuvre des savoirs dans une situation contextualisée. C'est aussi un bon moyen d'évaluation de la performance de l'apprenant ou d'un contrôle des connaissances d'un apprenant, car ce dernier est impliqué dans une situation réaliste, dans laquelle il va pouvoir mobiliser des compétences afin d'en démontrer la maîtrise.

Le terme simulation fait souvent référence dans l'esprit commun à des dispositifs relativement coûteux et proches du réel dans lesquels des apprenants peuvent pratiquer sans avoir à aller sur le lieu de l'activité professionnelle réelle. La simulation peut également faire référence à des situations utilisant le numérique comme l'explique Guéraud *et al.* (1999) en distinguant trois types de simulation informatiques :

- **Simulation pour comprendre** : L'objectif de ces simulateurs est de tirer parti de la puissance de calcul des ordinateurs modernes dans le but de progresser sur la compréhension d'un phénomène précis.
- **Simulation pour construire** : Il s'agit ici de simuler un nouvel objet, sans avoir à le créer véritablement. Ces simulations englobent par exemple les logiciels de prototypage ou de conception de plan de bâtiment.

- **Simulation pour apprendre** : Ce type de simulation correspond aux situations permettant de mettre en place un apprentissage et une évaluation. Les techniques de simulation pour cette catégorie dépendent des finalités pédagogiques.

Guéraud *et al.* (1999) détaillent deux raisons principales qui justifient l'utilisation de la simulation dans un contexte d'apprentissage. Tout d'abord il y a les raisons *affectives* : « *l'attrait de la simulation pour l'apprenant, l'augmentation de sa motivation, une meilleure compréhension des phénomènes, une plus grande aptitude à l'adaptation pour des problèmes similaires dans d'autres contextes* » (Guéraud *et al.*, 1999). Puis vient les raisons dites *pratiques* : « *le travail sur un système réel peut être trop coûteux ou trop long, dangereux pour l'homme, l'environnement ou le matériel, source d'angoisse pour le débutant* » (Guéraud *et al.*, 1999). L'autre intérêt cité par les auteurs réside dans le fait que la simulation peut introduire des situations dangereuses de manière à entraîner l'apprenant à réagir face à ces cas spécifiques.

Dans un lycée professionnel, des travaux pratiques sont organisés via des simulations qui se déroulent sur des plateaux techniques. Les apprenants vont par exemple mobiliser leurs compétences en pilotage de ligne de production sur une véritable ligne ou alors sur des maquettes adaptées aux besoins pédagogiques. Dans la formation professionnelle, la simulation permet de mettre les apprenants face à des situations spécifiques qui peuvent être rares dans la réalité, mais qui doivent être maîtrisés. Ou encore des fonctionnements dégradés afin de travailler des procédures de diagnostic ou d'adaptation à la dangerosité de l'aléa simulé. Simuler sur le plateau technique une activité professionnelle permet également de mobiliser des compétences précises qui ne peuvent pas être impliquées lors d'un travail théorique sur table. C'est pourquoi dans les filières professionnelles la dimension pratique des enseignements grâce à des équipements de simulation comme des maquettes pédagogiques est très présente, afin de pouvoir développer efficacement les compétences des apprenants.

La simulation en lycée professionnel peut aussi être détachée de toute maquette, notamment avec les simulateurs d'entretien d'embauche ou encore la simulation d'échanges

entre des Entreprises d'Entraînement Pédagogiques (EEP)^{1 2} pour les filières vente et commerce. Les simulations numériques sont très variées en raison de la multitude de supports possibles. Cette variété est un atout pour la pédagogie, car cela permet d'adapter la situation pédagogique aux attentes des apprenants et également au contexte pédagogique que l'on souhaite mettre en place avec les apprenants. Le numérique autorise plusieurs supports, qui peuvent être utilisés en fonction de la situation pédagogique. Par exemple, cela peut être l'utilisation d'un smartphone pour visualiser en réalité augmentée les pièces internes d'une machine (Minoufekar *et al.*, 2019), l'utilisation de vidéos pour illustrer une procédure précise, ou encore la mobilisation de la RV pour effectuer une activité pédagogique précise.

La didactique professionnelle est un concept multifactoriel majeur lors des situations d'apprentissages où théorie et pratique sont abordées au cours d'une même situation. Pour faciliter la mise en place de ces situations dans le cadre de la formation professionnelle, des méthodes comme la simulation existent. Elles sont également un support pour évaluer les compétences de l'apprenant. La simulation permet aux apprenants de se rapprocher des situations professionnelles, notamment en utilisant des dispositifs présents dans le monde professionnel. Grâce aux simulations numériques, et plus spécialement, grâce à la RV, il est tout à fait possible de créer une situation d'apprentissage qui reproduise fidèlement un atelier de production. C'est-à-dire qu'en plus d'utiliser une machine industrielle, l'apprenant peut évoluer dans un environnement virtuel cohérent avec la mission pédagogique. Contrairement aux plateaux techniques qui ne permettent pas de simuler efficacement des éléments autres que ceux proposés par les équipements et maquettes pédagogiques. De plus, les conséquences des actions de l'apprenant dans le monde virtuel ne sont pas irrémédiables, ce qui constitue un avantage clef de l'utilisation des simulations numériques. Le numérique autorise également la remontée instantanée d'informations à propos des réalisations des apprenants sur des logiciels de gestion de classe, régulièrement utilisés dans les établissements scolaires. L'utilisation du numérique et en particulier des applications de RV devient alors un atout majeur pour la mise en place des situations de didactique professionnelle.

1. <https://www.greta-cfa-paysdelaloire.fr/nos-prestations/entreprise-dentraînement-pédagogique->

2. <http://www.filafilcholet.com/content/6-filfil-EEP-cholet>

2.2 Utilisation de la réalité virtuelle pour la formation professionnelle

2.2.1 Utilisation de la RV

Les utilisations de la RV à des fins d'enseignement sont nombreuses, cela peut être des applications pour le domaine médical (Sementille, 2004), industriel (Wasfy *et al.*, 2005), aérospatial (Clergeaud *et al.*, 2016) ou encore militaire (Taupiac, 2018). Nous allons donc ici faire un inventaire succinct des différentes approches utilisant la RV à des fins de formation.

Le domaine médical est un domaine qui utilise régulièrement la RV à des fins de formation. Plus particulièrement pour des situations qui mettent en place des visualisations de certains organes (Marescaux *et al.*, 1998; Liu, 2015; Kaddour *et al.*, 2020; Javaid et Haleem, 2019; Mathur, 2015; Lin *et al.*, 2013) en vue de former les apprenants sans avoir à manipuler des organes réels (Figure 2.2). Avec parfois la possibilité de simuler une intervention sur l'organe en question à l'aide de dispositifs haptiques (Marescaux *et al.*, 1998; Burdea *et al.*, 1999). Le possible lien avec des données numériques extraites d'IRM est particulièrement intéressant, dans le sens où les données sont directement celles d'un patient (Zhang *et al.*, 2001; Qiu *et al.*, 2010). Cela peut aussi être l'utilisation de cette technologie comme moyen de réduction de l'anxiété lors d'opérations chirurgicales (Alaterre *et al.*, 2020). Dans ces applications, la fidélité visuelle est un élément important, c'est pourquoi certains modèles 3D sont parfois issus de l'imagerie médicale (Górski *et al.*, 2017; Marescaux *et al.*, 1998; Liu, 2015; Kaddour *et al.*, 2020). En santé, le terme RV va couvrir toutes les applications numériques qui simulent par exemple une procédure, qu'elle utilise des moyens immersifs ou non (Sementille, 2004). Liu (2015) précise le terme *Immersive Virtual Reality* pour présenter ses travaux utilisant des casques de RV. La littérature médicale qui traite de la RV nous indique que les activités de visualisation ou d'exploration d'objets ou de lieux emblématiques constituent une approche formative intéressante, car les apprenants peuvent se représenter plus facilement un lieu ou un objet précis sans avoir à être réellement en présence de l'élément visualisé.

Les études qui portent sur l'utilisation de la RV pour la formation du personnel médi-

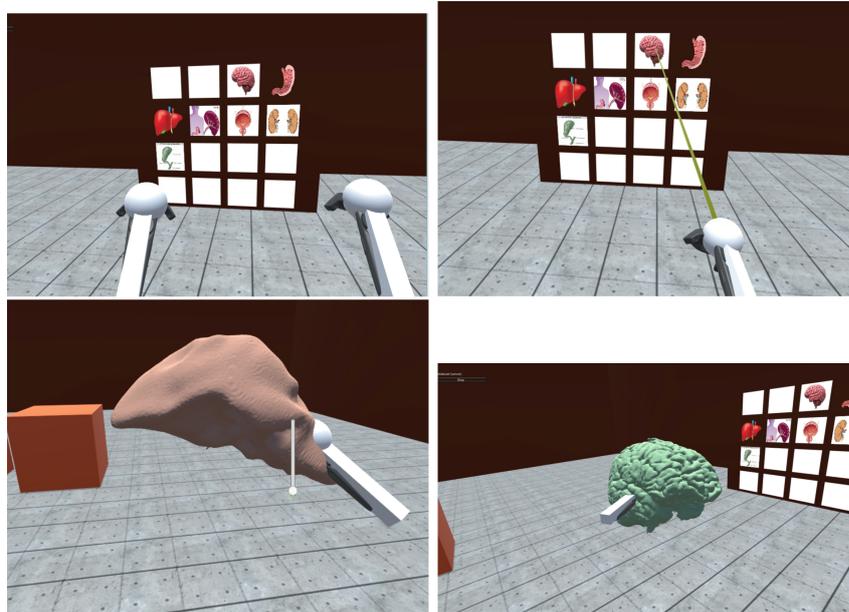


FIGURE 2.2 – L'application de Kaddour *et al.* (2020) permet de visualiser plusieurs organes en RV.

cal s'intéressent aux notions d'apprentissage et de charge mentale³. Dans Gallagher *et al.* (2005), les auteurs ont étudiés les différents facteurs à considérer pour intégrer correctement la RV dans un contexte de formation de chirurgiens. Il y est précisé que pour apprendre de nouvelles habiletés, un novice doit procéder à une observation poussée d'un chirurgien expérimenté. Comme observer les mains du praticien, l'organisation spatiale des équipements ou encore la lecture des signaux physiologiques du patient. Pour le novice, considérer ces éléments en même temps peut surcharger ses capacités de concentration, nuisant ainsi à la qualité de la formation. C'est pourquoi les auteurs précisent que l'utilisation de la RV permet au novice d'automatiser certaines compétences, lui permettant d'avoir plus de ressources cognitives pour l'observation du chirurgien expérimenté (Figure 2.3). Pour la formation professionnelle, les mêmes problématiques de ressources cognitives interviennent, notamment lors de l'utilisation d'un nouvel équipement, où l'apprenant doit considérer, entre autres, les règles de sécurité, les consignes, les manipulations.

Górski *et al.* (2017) proposent une méthodologie pour concevoir des applications

3. Cette notion sera détaillée dans le prochain chapitre.

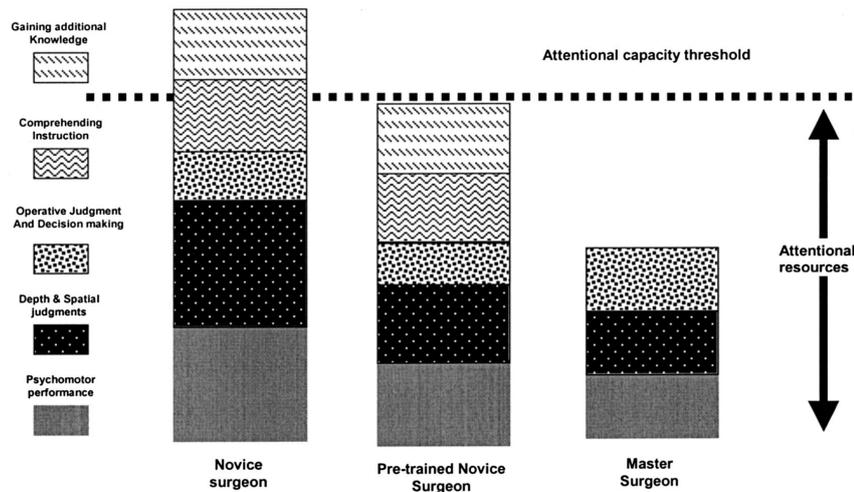


FIGURE 2.3 – Modèle de Gallagher *et al.* (2005) de la répartition des ressources cognitives entre un chirurgien novice, *pré-entraîné* et expert. Le chirurgien novice pré-entraîné maîtrise déjà des compétences grâce à la simulation, réduisant ainsi les ressources cognitives allouées à ces compétences.

médicales de RV dites *KOMVR (Knowledge Oriented Medical VR)* (Figure 2.4). Le cycle décrit est un cycle de conception classique que nous allons réutiliser plus loin dans ce manuscrit pour décrire notre approche de conception. Les auteurs mettent l'étape de visualisation des modèles 3D comme étant une étape clef du processus de création, parce que dans leur concept d'étude, la fidélité visuelle est très importante pour le résultat final. Dans notre cas d'étude, il se peut que la visualisation soit moins importante que le contenu pédagogique. Les étapes de conceptions peuvent donc dépendre du métier ciblé et surtout des connaissances/compétences visées, ce qui complexifie la mise au point d'une méthode de conception universelle valable dans plusieurs filières professionnelles.

Dans l'industrie, la RV est elle aussi de plus en plus utilisée pour mettre en place des situations de formation ou d'amélioration des moyens de production (Berg *et al.*, 2017). Le terme *Industrie 4.0* est souvent utilisée lorsque la RV ou la RA sont utilisées dans le domaine de l'industrie. L'intérêt premier réside dans la possibilité de reproduire le comportement de certaines machines ou procédures industrielles. Par exemple Wasfy *et al.* (2005) proposent un système, appelé *AVML pour Advanced Virtual Manufacturing* dans lequel une machine à commande numérique trois axes (*Com-*

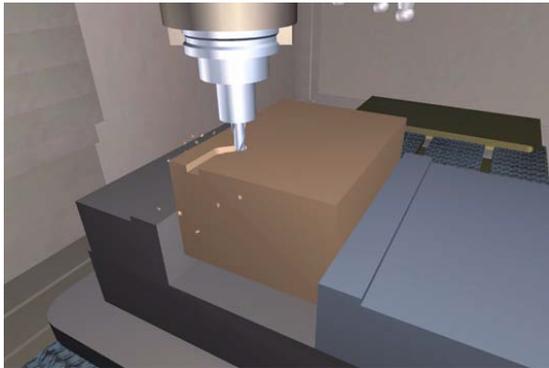
Stage	Activities	Tools	End result
1 – planning	Defining criteria of selection, using analytical methods for choosing components	Decision-aiding tools: Analytical Hierarchy Process, fuzzy logic, cluster analysis	Selected and obtained software and hardware – BOM of VR system
2 – visualization	Preparation of 3D and 2D models, export-import procedures, hierarchy and navigation	3D modeling tools, 2D graphics tools, VR software engine	Non-interactive 3D visualization with navigation
3 – programming	Planning actions on objects, triggered by specific sensors	VR software engine, programming software*	Interactive visualization
4 – user interface	Application of graphical user interface, connection of all hardware components	VR software engine, programming software*	Complete VR application
5 – verification	Internal tests with or without medical specialists	VR software engine, survey studies	Guidelines for application improvement

* Optionally, if needed for development of additional, external modules

FIGURE 2.4 – Résumé des étapes de conception d’une application de RV médicale selon Górski *et al.* (2017).

puter Numerical Control (CNC)) est modélisée dans le but de simuler un usinage de pièces. La CNC ainsi présentée permet de découper des volumes dans des pièces (Figure 2.5a) et est aussi accompagnée d’un module d’assistance visant à donner des connaissances à l’utilisateur, les assistants virtuels seront détaillés plus précisément dans le chapitre deux de ce manuscrit. La machine possède aussi un pupitre pour réaliser des opérations de la même manière que la véritable machine (Figure 2.5b). Cette implémentation modélise la déformation du modèle 3D de la pièce usinée en temps réel, le calcul de force sur l’outillage ainsi que toutes les contraintes que l’on peut rencontrer sur une machine réelle, ce qui en fait un support pédagogique pertinent. En effet, cela permet par exemple d’illustrer comment choisir les bons forets d’usinage, d’étudier des matériaux grâce au comportement de la simulation informatique ou encore de mettre en fonctionnement de la machine grâce au pupitre. La fidélité de cette machine permet à des apprenants qui savent utiliser cette dernière ou un équivalent, d’être autonome rapidement, car la numérisation de la machine et du comportement sont proche du réel, ce qui réduit le temps de prise en main pour un apprenant initié. Le réalisme des comportements numérisés est important lors d’une utilisation pédagogique de la RV.

Les industries ne s’intéressent pas à la RV uniquement pour faire de la modélisation



(a) Capture d'écran de l'usinage d'une pièce dans le système AVML (Wasfy *et al.*, 2005).



(b) Pupitre de la CNC décrite dans (Wasfy *et al.*, 2005).

FIGURE 2.5 – Le système AVML de Wasfy *et al.* (2005).

de *process* ou de la simulation de panne. La formation aux pratiques de sécurité est également plébiscitée dans certains milieux comme l'industrie minière (Van Wyk et De Villiers, 2009; Kizil, 2003; Nickel *et al.*, 2019). Van Wyk et De Villiers (2009) expliquent en introduction de leur article que, dans le cas des mines d'Afrique du Sud, il a été recensé 264 décès dans les mines en 2003, par conséquent la prévention des risques dans ce genre d'environnement s'impose comme une nécessité pour les mineurs. Ce constat est aussi fait par Kizil (2003) où la RV montre tout son potentiel dans des situations de prévention des risques miniers. D'autres industries, comme le nucléaire s'intéressent également à la RV, comme l'expliquent Bowen *et al.* (2019) en proposant un système de formation en RV à la prévention des risques d'actes malveillants au sein d'une centrale nucléaire. L'objectif de cette approche est de mieux former les personnels de ces lieux critiques sans avoir à interférer avec le fonctionnement réel de la centrale. Yanchapanta *et al.* (2019) proposent un environnement virtuel de formation à propos des systèmes réfrigérants. Ils ont reproduit le comportement d'un système frigorifique dans lequel plusieurs aléas peuvent être présents tels que la présence d'air dans le système ou encore l'identification d'un problème sur le circuit. Pour plus de

justesse dans la situation virtuelle, les auteurs précisent que la digitalisation des visuels et des comportements a été effectuée à partir d'un banc de test réel, de manière à avoir une situation pédagogique plus cohérente pour l'apprenant. Pour ce dernier exemple, l'intérêt de la RV réside également dans le fait que les apprenants n'ont pas à manipuler les fluides frigorigènes, ce qui constitue une réduction des risques, mais aussi une économie de consommables, qui peut être onéreuse dans certains cas. Par ailleurs, numériser une maquette pédagogique réelle peut être appropriée pour les apprenants, car d'autres usages de cette maquette peuvent être envisagés en virtuel.

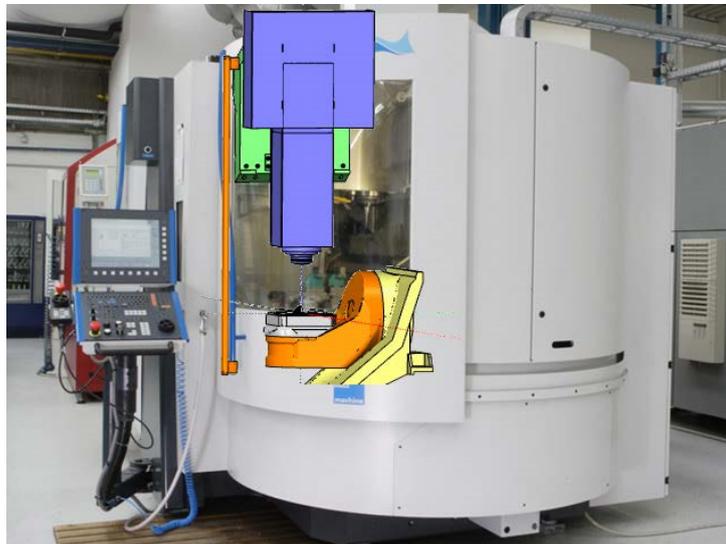


FIGURE 2.6 – L'utilisation de la RA sur une machine à commande numérique dans l'étude de Minoufekr *et al.* (2019).

Plus récemment, Makransky et Petersen (2019) utilisent une simulation sans support immersif (Figure 2.7) pour étudier les changements positifs en termes de motivation et de connaissances. Les résultats de cette étude suggèrent que plusieurs éléments sont à considérer lorsque l'on souhaite utiliser les supports numériques pour l'éducation : l'utilisabilité, qui constitue les auteurs un bon moyen de motivation, ainsi qu'une bonne intégration dans la classe, par le biais de *blended learning*. Ils précisent également que des simulations autonomes, versatiles et réutilisables sont préférables d'un point de vue économique et pratique. Cela signifie que pour une utilisation pédagogique pertinente, il est appréciable de mettre en place des processus et des méthodes conceptuelles spécifiques permettant d'atteindre ces degrés de versatilité et

réutilisabilité.



FIGURE 2.7 – L'EV utilisé dans l'étude de Makransky et Petersen (2019).

La littérature en RV pour la formation est fournie. Par rapport à notre projet de recherche, nous remarquons que les articles qui traitent de RV pour la formation mettent en avant des situations expérimentales et peu d'utilisations à plus grande échelle comme au sein d'établissements scolaires en dehors des conditions de laboratoire. En effet, la RV en formation est peu utilisée en raison du manque de contenu pertinent pour les enseignants (Olmos *et al.*, 2018). Le domaine médical met souvent au premier plan des utilisations pour de jeunes chirurgiens ou apprenants en médecine. Néanmoins, le contexte de tels ateliers pratiques diffère fortement de notre cas d'étude qui est la formation professionnelle dans les lycées. La littérature scientifique ne traite pas encore de l'organisation de la classe en filière professionnelle avec la RV. Or cela constitue un élément de questionnement pour les enseignants, comme peut l'illustrer le rapport de Becchetti-Bizot (2017) de même que le mémoire de Bourgouin (2017). D'un point de vue technique, la RV est au point, les méthodes d'interactions sont également bien documentées et discutées dans la littérature. En revanche, les usages concrets dans les établissements ne sont pas encore suffisamment présents dans la littérature. Ce manque d'informations peut conduire à de mauvaises approches d'utilisation de la RV pour la formation professionnelle. Les enseignants souhaitent des outils pertinents avec un réel intérêt pédagogique pour convenir aux besoins de leurs

filières et de leurs apprenants. Par conséquent les situations virtuelles se doivent d'être conçues en prenant en compte ces besoins précis. Par ailleurs, la place de l'enseignant doit être étudiée plus précisément, car les contraintes de la formation professionnelle complexifient une transposition des travaux appliqués au milieu universitaire ou général en formation professionnelle. Ne serait-ce qu'à cause des effectifs, des moyens techniques et financiers ou encore de la répartition du temps passé sur les plateaux techniques avec le temps passé en classe. Les apprenants doivent être opérationnels dans des temporalités courtes, c'est pourquoi les instants pratiques notamment grâce aux maquettes pédagogiques ont une place importante dans les cursus. Il faut donc expérimenter des approches d'utilisation de la RV au sein même des établissements avec les enseignants et les apprenants.

Nous pouvons retenir que la RV peut posséder de nombreux avantages dans un contexte d'éducation :

- **Un impact sur la motivation** (Makransky et Petersen, 2019; Palkova et Hatzilygeroudis, 2019; Al-Azawei *et al.*, 2019; Stojšić *et al.*, 2018).
- **La visualisation de lieux habituellement inaccessibles.** Comme un réacteur nucléaire (Bell et Fogler, 2004; Nemeč *et al.*, 2017), le système solaire (Yair *et al.*, 2001) ou encore le monde de l'infiniment petit comme le montre l'étude de Limniou *et al.* (2008).
- **Une réduction des risques.** En simulant des situations qui sont potentiellement dangereuses (Nemeč *et al.*, 2017; Jensen et Konradsen, 2018).
- **Des nouvelles méthodes d'enseignement.** Qui peuvent potentiellement mieux correspondre à la nouvelle génération ultra-connectée d'apprenants (Ghosh Dastider, 2019; Palkova et Hatzilygeroudis, 2019).

Précisons cependant que dans un lycée, l'équipement peut être mutualisé entre les différentes sections et classes qui le composent, ce qui peut freiner certains usages de cette technologie. Une solution simple serait d'équiper les établissements de plus de dispositifs, de manière à améliorer le taux d'utilisation. Néanmoins, cela a un coût,

et compte tenu du contexte financier de certains établissements et du système éducatif français en général, les financements alloués à ces équipements ne permettent pas de mettre en place une grande quantité de casques de RV. Dans la littérature, les approches de formation utilisant la VR mettent en situation un apprenant réalisant une activité pédagogique. La place de l'enseignant est très peu précisée dans les études, ce qui amène à se demander quelle place doit occuper l'enseignant au sein de ce système de formation. Doit-il être avec l'élève en immersion, ou alors avec le reste de la classe ? Dans le cadre d'une formation de chirurgie, les effectifs peuvent être plus bas que dans une classe de Bac Professionnel Commerce par exemple, où les effectifs peuvent être parfois de 40 par classe. Cet aspect organisationnel de la RV en contexte réel n'est pas encore suffisamment étudié. Nous déplorons cette situation, car de nombreux acteurs industriels proposent de plus en plus de situations de formation à l'aide de casque de RV. Or utiliser un casque n'a pas les mêmes implications logistiques qu'utiliser un *Serious Game* (SG) dans une salle informatique équipée d'un poste par élève. Nous allons donc dans ce manuscrit tenter de proposer différentes approches d'utilisation de la RV pour que cela convienne aux réalités rencontrées par les enseignants et élèves dans les établissements.

2.2.2 Scénarisation d'une activité pédagogique

Dans notre contexte, nous appelons scénario pédagogique l'activité, virtuelle ou réelle qui correspond à une activité professionnelle. Un scénario est composé de plusieurs tâches, qui mises bout à bout constituent un enchaînement cohérent qui peut être qualifié de scénario. Brassard et Daele (2003) qualifient un scénario comme étant « *le résultat du processus de conception d'une activité pédagogique* ». Dans notre cas d'étude, un scénario consiste en une activité professionnelle, découpée en plusieurs sous-tâches qu'un apprenant doit réaliser au sein du contexte virtuel. Le point d'entrée du scénario est généralement la consigne ou le contexte donné par l'enseignant. En sortie, le scénario virtuel doit être capable de gérer des données qui seront utilisées à un autre moment, par exemple, pour effectuer un débriefing.

Avant de concevoir une application de RV pour la formation, il faut formaliser l'activité pédagogique en écrivant le scénario. Pour ce faire, il convient de ne pas se

restreindre uniquement à la RV. En effet, l'écriture d'activités pédagogiques n'est pas fonction du moyen final utilisé. Une activité consiste en une procédure précise qu'un apprenant devra effectuer, dans le but de travailler certains savoirs et de mobiliser des compétences précises. Dans une approche classique, l'enseignant s'occupe de concevoir l'activité, ce dernier possède la maîtrise complète de la pédagogie, du profil de ses apprenants ainsi que du moyen de réalisation. Ces méthodes de conception classiques ont souvent fait leurs preuves et il convient d'exploiter cette expérience pour le virage numérique de l'éducation.

Le numérique amène de nouvelles modalités d'exploitation pédagogique, néanmoins, le niveau de maîtrise nécessaire à l'utilisation et l'adaptation des outils numérique est en constante augmentation. Cette différence de maîtrise contribue à creuser les inégalités entre les enseignants à l'aise avec l'outil informatique et ceux qui ne maîtrisent pas l'informatique. Au regard de cette constatation, nous pouvons préciser que les enseignants qui ne maîtrisent pas l'informatique ne sont pas tous dans une situation de manque de compétences, en effet, chaque individu possède ses affinités avec les outils numériques et chacun est libre de s'y intéresser ou pas. Imposer un outil constitue selon nous une erreur, et il convient de prendre le temps de comprendre les motivations de certaines réticences et savoir reconnaître lorsqu'une activité pédagogique n'est pas compatible pour une utilisation en virtuel.

Cela étant dit, concevoir une activité pédagogique numérique demande plus d'efforts que pour une activité réelle. Le numérique change les pratiques. L'enseignant peut ne pas être capable de concevoir l'activité numérique, il faut dans ce cas précis faire intervenir un tiers, comme un développeur ou un référent technopédagogique qui possède les connaissances suffisantes pour mettre en place informatiquement l'activité. La situation « d'auto-crédation » évolue vers un modèle plus proche de la gestion de projet, où le « client » serait l'enseignant et le « fournisseur » les équipes en charge du développement. Dans la littérature scientifique, des chercheurs se sont intéressés aux différentes approches à adopter pour assister l'enseignant dans cette démarche de création de contenu digital (Marne et Labat, 2014; Oubahssi et Piau-Toffolon, 2017; Vermeulen *et al.*, 2017). Ces approches informatiques seront discutées dans le prochain chapitre. En effet, l'enseignant possède la maîtrise pédagogique et la connaissance du profil des élèves alors que le développeur/expert en numérique est à l'aise

avec la technique dans sa globalité. Il faut donc mettre en place des aides et méthodes pour que les deux acteurs puissent échanger et se comprendre.

Selon nous, le scénario pédagogique est le socle de toute application de RV pour la formation professionnelle. Cela place donc l'écriture du scénario comme étant l'élément le plus critique, car c'est lui qui va déterminer l'implémentation, les différents niveaux à adopter ainsi que l'évaluation à mettre en place pendant et après l'activité virtuelle.

2.2.3 Système adaptatif

En contexte d'apprentissage, il est souvent mis en avant la nécessité de faire des enseignements individualisés et adaptés au profil de l'apprenant. Selon Perrenoud (1992), l'enseignement différencié s'impose comme une évidence, précisant que « *toute situation didactique proposée ou imposée uniformément à un groupe d'élèves est inévitablement inadéquate pour une partie d'entre eux* ». Au cours d'une scolarité, tous les élèves ont déjà eu l'occasion de constater qu'au sein d'une classe, tous les niveaux ne se valent pas, certains sont en avance sur la classe et d'autres peuvent accumuler du retard. Perrenoud (1992) propose une définition de l'enseignement différencié, mais précise cependant qu'il s'agit d'un idéal. En effet, créer des situations didactiques adaptées aux différents profils d'apprenants peut se montrer complexe pour les enseignants. Dans le cas du numérique, certains auteurs tels que Rumetshofer et WöB (2003); Pearson *et al.* (2009) soulignent que les systèmes de *e-learning* manquent d'accompagnement individuel ou de guidage des élèves. La notion de *Personal Learning Environment* intervient alors, où l'on souhaite personnaliser le *LMS* pour permettre à l'utilisateur de rajouter des outils qui lui corresponde.

Cette notion d'adaptabilité des enseignements est aussi valable pour les nouveaux moyens d'apprentissages tels que le numérique (Makransky et Petersen, 2019). Barot (2014) précise dans son manuscrit de thèse qu'une approche adaptative de l'écriture d'un scénario permettrait de mieux correspondre au profil de l'élève, comme en prenant en compte les résultats d'une session précédente pour améliorer la session en cours. Pour ce faire, Barot *et al.* (2013) propose un modèle, *SELDON*, qui permet «

d'orienter le déroulement des événements en réalisant des ajustements ponctuels sur l'état du monde ou sur les personnages virtuels »(Barot, 2014). Parler d'adaptabilité permet d'arriver à un nouveau constat sur l'utilisation du numérique en classe : tous les élèves ne sont pas égaux face au numérique. Certains maîtrisent l'outil mieux que d'autres, et dans le cas d'applications *rigides*, les inégalités peuvent se creuser. En plus d'avoir une classe hétérogène vis-à-vis des apprentissages, certains enseignants vont devoir faire face à des problèmes liés aux usages du numérique. Voilà pourquoi adopter une démarche adaptative et dynamique peut tendre à gommer ces *nouveaux* problèmes.

Nous venons de parler de l'adaptabilité à propos du scénario pédagogique, cette notion d'adaptabilité va également de pair avec celle de difficulté adaptative (*Dynamic Difficulty Adaptation, DDA* (Hocine *et al.*, 2014). La DDA consiste à adapter la difficulté de la situation numérique en fonction du profil de l'utilisateur. L'adaptation permet de faire en sorte que l'activité ne soit ni trop simple, ni trop compliquée pour l'utilisateur. Hocine *et al.* (2014) proposent d'utiliser la DDA à des fins de réhabilitation des fonctions motrices grâce à des *serious games*. Adapter dynamiquement la difficulté passe forcément par une étape de récupération du profil de l'utilisateur. En effet, la difficulté va venir s'adapter au profil de l'utilisateur, ce qui oblige de mettre en place une méthode appropriée de récupération du profil. L'état initial du profil va déterminer le premier niveau de difficulté, par la suite, l'utilisateur va pouvoir évoluer d'un niveau à l'autre en fonction de sa performance. Le profil sera complété au fur et à mesure de la session numérique.

Par exemple dans un contexte d'essai-erreurs, l'application peut automatiquement donner des informations supplémentaires après une certaine quantité d'erreurs dans l'activité. Ou inversement, si les tâches sont bien réalisées rapidement, alors on peut complexifier la tâche pour s'adapter à l'aisance de l'utilisateur. Cette adaptation permet en quelque sorte d'individualiser les tâches en proposant une expérience sur mesure, qui dans le cas d'un apprentissage permet d'optimiser ce dernier. L'autre élément intéressant avec cette approche, c'est l'optimisation de la motivation de l'utilisateur, en maximisant la sensation de *flow*⁴ dans lequel il est présent. Le *flow* (Cziksentmihalyi, 1990) correspond à l'expérience optimale, à savoir une tâche suffisamment complexe

4. Terme détaillé dans le prochain chapitre

pour garder l'utilisateur concentré tout en évitant les abandons liés à une difficulté trop importante. La DDA peut aussi permettre à un utilisateur d'être moins dépendant de l'expérimentateur ou de l'enseignant (Verhulst *et al.*, 2015). Grâce à une approche utilisant de la DDA, l'enseignant serait capable d'autoriser plus d'autonomie aux utilisateurs en immersion, au profit du reste de la classe. Nous allons tenter de développer cette idée au cours du manuscrit, il s'agit d'une problématique omniprésente dans le monde de l'éducation professionnelle au sein des lycées.

2.2.4 Consignes et évaluation de l'apprenant

En conditions réelles, utiliser la RV avec des apprenants de formation initiale implique de proposer des moyens pour donner les objectifs de la session virtuelle. Nous avons vu dans la section qui traite des méthodes d'évaluation que le *briefing* peut être un bon moyen pour préparer un apprenant à une situation pédagogique. En revanche, il est justifié de proposer des méthodes permettant aux élèves d'accéder facilement aux consignes pendant la réalisation de l'activité pédagogique. Mellet D'huart (2004) exprime dans son manuscrit de thèse les consignes de la manière suivante :

« *La consigne est un moment particulièrement important de la mise en situation. Elle donne des repères quant au point de départ (positionnement, etc.), situe les objectifs à atteindre et, éventuellement, des étapes à franchir avant de les atteindre. Elle donne des indications sur ce qui va se passer et sur la manière d'aborder ces événements. Elle permet autant d'explicitier les intentions qui sont derrière la mise en situation que d'aider la personne à mobiliser son attention et à lui permettre de l'orienter.* » (Mellet D'huart, 2004).

Ces dernières font donc intégralement partie du processus d'apprentissage, en spécifiant les objectifs ainsi que les différentes étapes pour les atteindre. Comme le précise Perrenoud (1995b), l'évaluation des attentes et des consignes contribue à la réussite de l'apprentissage, car ces compétences telles que la compréhension des instructions sont des éléments qui seront toujours présents en situation réelle. Zakhartchouk (1996) s'intéresse dans son article aux consignes dans le domaine de l'éducation de manière générale et en plus de définir une consigne, fait également la distinction entre une *bonne consigne* et une *mauvaise consigne*. Créer une consigne est un exercice complexe pour les enseignants où le maniement de la langue ainsi que des reformulations

de termes sont parfois nécessaires pour que l'élève puisse comprendre les instructions. Par exemple utiliser un français formel et littéraire pour écrire une consigne en lycée professionnel peut être inadapté. Il est de même demandé à l'enseignant de faire preuve d'anticipation pour pouvoir prédire en quelque sorte les problèmes de compréhension de la consigne que les élèves peuvent avoir. De plus, l'enseignant n'a pas la garantie que l'élève lira convenablement les consignes. Il s'agit donc d'un exercice complexe, qui va venir influencer directement les performances des élèves.

Il existe plusieurs moyens de donner les consignes. En situation d'apprentissage réel, les élèves vont parfois avoir des instructions écrites, telles qu'une consigne pour un exercice sur table. Cela peut même être des instructions orales. Ces dernières sont régulièrement rencontrées dans des situations réelles, par exemple lors d'un stage, l'apprenant recevra les instructions à l'oral de son responsable ou de son maître de stage. Ces deux modalités, bien que différentes dans la forme restent sensiblement identiques sur le fond, où l'apprenant doit comprendre les instructions pour mener à bien l'activité. La mémoire est également mise à contribution dans le cas de la consigne orale, car le responsable ne sera pas toujours derrière l'apprenant pour rappeler la consigne.

Dans le cas de l'usage du numérique, il est important de prendre en considération la façon dont les consignes sont données. Nous développerons plus longuement les problèmes que nous avons rencontrés lors d'expérimentations dans les lycées, car l'un des problèmes majeurs de l'utilisation de la RV en contexte de formation professionnelle réside dans les consignes. Temperman *et al.* (2017) proposent un système de relance par QR code dans un contexte d'apprentissage utilisant un manuel scolaire augmenté (Figure 2.8). Les QR codes sont renseignés dans le manuel à des endroits spécifiques où les apprenants peuvent, s'ils le souhaitent avoir de plus amples informations sur un sujet précis. Dans la revue de littérature des auteurs, ces derniers s'attardent sur la notion de régulation des apprentissages, où ils soulignent l'importance de mettre à disposition des élèves, des outils d'aide, qu'ils peuvent mobiliser en fonction de leurs besoins. La présence de *prompts* ou guides précis peuvent contribuer à faciliter l'autorégulation de l'apprentissage de l'élève (Bannert, 2009). L'étude de Temperman *et al.* (2017) conclue que les effets de relance et la présence de prompts est bénéfique pour l'apprenant. Le guidage de l'apprenant dans la recherche d'informations

est facilité, ce qui est pertinent pour le travail en autonomie. Précisons en revanche que ce genre d'approche ne vient pas remplacer les interactions humaines entre l'élève et l'enseignant. Ces échanges seront toujours indispensables, mais comme l'expriment les auteurs, il s'agit dans leur cas d'étude d'un moyen peu coûteux et accessible pour mettre en place des méthodes complémentaires d'accès à l'information.

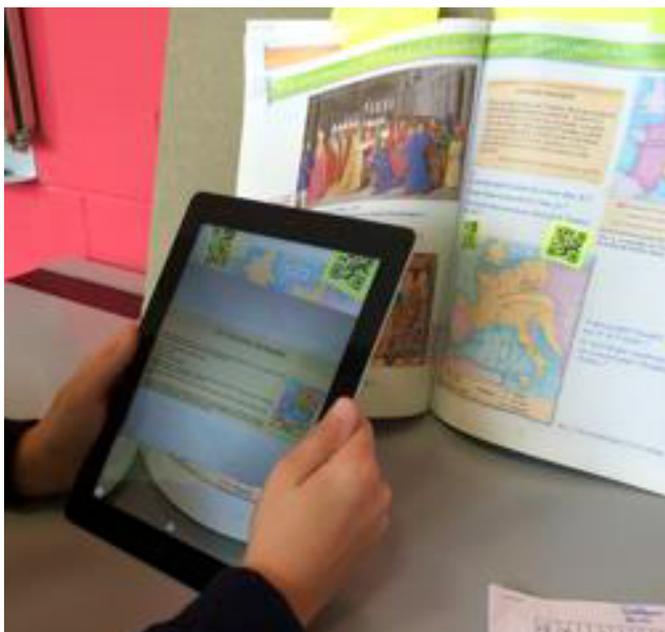


FIGURE 2.8 – Relances par QR code décrites par Temperman *et al.* (2017).

Force est de constater que la littérature n'est pas très fournie à propos des différentes méthodes à mettre en place pour donner des instructions en contexte de RV. L'approche classique consiste à utiliser les moyens utilisés en réel et de les transposer en virtuel. Les études qui traitent des relances comme l'article de Temperman *et al.* (2017) sont intéressantes, car cela peut soulever l'intérêt de diviser les instructions afin de donner les informations lorsqu'elles sont nécessaires, pour ne pas trop surcharger l'apprenant d'informations inappropriées pour cet instant précis de la situation pédagogique. Cela soulève aussi un raisonnement à propos de la prise en compte des profils d'utilisateurs. Par exemple, pour un novice, les consignes peuvent être fragmentées alors que pour un expert ou un élève en condition d'évaluation, des consignes moins directives peuvent être mises en place.

En situation d'apprentissage, la compréhension des consignes peut être le premier frein à la progression. Les usages du numérique, comme l'utilisation de guides virtuels⁵, nous permettent de mettre en place des aides supplémentaires, pour pallier ces problèmes de compréhension ou d'interprétation des consignes.

2.2.5 La RV comme support d'évaluation de la performance

Nous venons de voir dans la première section de ce chapitre que l'évaluation de l'apprenant est un processus complexe qui ne se résume pas uniquement à appliquer une note sur la performance d'un élève lors d'un contrôle des connaissances. L'utilisation du numérique implique également de porter son attention sur les modalités d'évaluation de l'apprenant ainsi que l'évaluation de l'outil en lui-même. Concernant l'évaluation des performances de l'apprenant, la littérature nous donne des informations sur certaines modalités d'évaluation à l'aide des outils numériques. Par exemple, Zaharudin et Ting (2019) comparent les lieux de complétion des évaluations faites par les apprenants, au sein du monde virtuel ou en dehors. D'autres auteurs comme Lin *et al.* (2002) proposent un module d'évaluation autonome en RV qui a pour rôle d'observer l'utilisateur et de collecter des données. Ce processus d'évaluation se rapproche de l'observation et bien que le numérique permet des observations exhaustives et précises, le système seul ne peut conduire une approche didactique précise, l'enseignant doit intervenir pour pouvoir caractériser les indicateurs de performances de l'apprenant dans la session virtuelle (Radigois, 2018). Cette caractérisation est primordiale pour les enseignants et pour les apprenants, car cela permet de cibler précisément l'objectif de la séance pédagogique. En effet, ces indicateurs sont liés à des compétences précises et adaptés, permettant une évaluation objectivée de la performance. Les processus d'évaluation décrits dans la littérature se concentrent majoritairement sur l'étude du lieu et de la forme de l'évaluation. Cependant les processus d'évaluation impliquant une exploitation des traces numériques par l'apprenant pour par exemple conduire une évaluation formative (entretien d'explicitation) sont très peu discutés.

5. Élément détaillé dans le prochain chapitre.

2.3 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons défini la didactique professionnelle ainsi que certaines pratiques pédagogiques telles que l'approche par compétence ou l'apprentissage par l'erreur. Ces pratiques peuvent être revisitées à l'ère du numérique pour donner de nouvelles modalités d'apprentissage, notamment exploitant les technologies de la réalité virtuelle. Les fondements théoriques de l'éducation sont également essentiels à considérer dans cette évolution. Enfin, il est justifié de bien connaître et intégrer les pratiques des enseignants pour aboutir à des usages réels.

L'approche par compétences utilisée dans les lycées influence directement la conception de solutions numériques de formation, dans le sens où l'enseignant souhaite exploiter des indicateurs de performance et non des rapports avec une note sans exploitation pédagogique possible. Nous avons aussi mis en avant dans ce chapitre d'autres éléments qui vont guider la conception de l'écriture du scénario pédagogique jusqu'à l'exploitation même de l'outil, comme les consignes qui auront pour rôle de guider l'apprenant dans la tâche de formation ou la notion d'adaptabilité du scénario. Pour ce dernier point, nous évoquerons dans les chapitres suivants l'intérêt de la mise en place de situations versatiles qui puissent être modulées en fonction du profil de l'apprenant et des objectifs pédagogiques. Rendre le numérique pertinent avec une multitude de profils constitue l'une des problématiques majeures de l'implantation de ces nouveaux supports de formation au sein des lycées. Dans le chapitre suivant, nous détaillons les aspects techniques de la RV ainsi que les interactions et approches informatiques qui constituent cette technologie.

OUTILS ET TECHNIQUES D'INTERACTIONS 3D

La Réalité Virtuelle (RV) est un domaine étudié depuis plusieurs décennies. Le premier dispositif multisensoriel de RV à proprement parlé est le Sensorama (Morton Heilig, 1962), puis le premier casque de RV en 1968 avec le *The Sword of Damocles* (Sutherland, 1968). La RV connaît un réel engouement depuis la commercialisation du kit de développement de l'Oculus Rift (DK2). Dans ce chapitre, nous allons effectuer un état de l'art lié à la RV ainsi qu'aux méthodes et technologies qui y sont associées. Dans l'esprit commun, la RV est souvent associée aux dispositifs de visualisation de type casque de RV pour une utilisation vidéo ludique. Cependant il ne s'agit là que d'une infime partie des capacités de cette technologie. Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les utilisations dans le domaine de la formation sont nombreuses. Les éléments liés aux techniques d'interaction, modalités d'affichage ou encore au choix du design doivent être étudiés de façon pluridisciplinaire pour optimiser l'expérience utilisateur d'un environnement pédagogique virtuel. Ce chapitre commence par proposer une définition de la RV ainsi que des termes qui y sont associés. Puis nous évoquerons également les différentes interactions possibles en virtuel, de même que les éléments de scénarisation pertinents pour une situation de formation assistée par le virtuel.

3.1 La Réalité Virtuelle

3.1.1 Concepts et définition

La notion de RV a été introduite en 1988 par Jaron Lanier :

« *Maybe we should go over what Virtual Reality is. We are speaking about a technology that uses computerized clothing to synthesize shared reality. It recreates our relationship with the physical world in a new plane, no more, no less. It doesn't affect the subjective world; it doesn't have anything to do directly with what's going on inside your brain. It only has to do with what your sense organs perceive. The physical world, the thing on the other side of your sense organs, is received through these five holes, the eyes, and the ears, and the nose, and the mouth, and the skin. They're not holes, actually, and there are many more senses than five but that's the old model, so we'll just stick with it for now.* », Lanier (1988).¹

Depuis lors, il y a eu une multitude de définitions et d'interprétations de ce qu'est la RV. Dans son ouvrage, Fuchs (2016) propose une définition fonctionnelle et technique de la RV. Ces définitions sont liées au constat qui est fait vis-à-vis de la notion réductrice de RV pour le grand public, à savoir « *l'utilisation d'un matériel : les casques immersifs ou casques de réalité virtuelle* » (Fuchs, 2016). D'autres définitions existent comme celles basées sur la notion de téléprésence (Held et Durlach, 1992), notamment en robotique, ou encore comme étant un outil (Burdea et Coiffet, 1994) servant à accompagner un individu dans ses activités de rééducation motrices. Nous avons choisi d'utiliser ici la définition de Arnaldi *et al.* (2003), à savoir :

« *La réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec une personne en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs* » (Arnaldi *et al.*, 2003).

Le monde virtuel ainsi créé est interprété par l'utilisateur par le biais de différents moyens techniques qui stimulent les sens tels que le toucher, la vue, l'ouïe ou encore l'odorat. Soulignons cependant que les sens les plus mobilisés en RV sont l'ouïe et la vue. Bien que l'odorat et le toucher peuvent également être stimulés sensoriellement

1. Traduction personnelle : « *Nous parlons d'une technologie qui utilise l'informatique pour synthétiser une réalité partagée. Elle recrée notre relation avec le monde réel dans un nouvel espace, ni plus ni moins. Elle n'affecte pas le monde subjectif; elle n'influence pas directement ce qui se passe dans votre esprit. Elle agit uniquement sur les sens perçus par vos organes. Le monde physique, la chose qui se trouve de l'autre côté de vos sens, est perçu par cinq moyens : les yeux, les oreilles, le nez, la bouche et la peau. Il existe en fait plus que cinq sens, il s'agit du vieux modèle, mais nous utiliserons celui-là pour l'instant.* »

en RV, cela suggère l'utilisation de moyens techniques intrusifs conséquents, comme des dispositifs haptiques intégraux. Un système de RV peut être simplifié en considérant les entrées et les sorties. L'utilisateur peut agir sur le système grâce à des dispositifs d'entrée tels que des contrôleurs (qui peuvent dans certains cas retourner une information comme une vibration). Cette entrée déclenche par la suite des réactions programmées du système pour fournir à l'utilisateur un retour sur le nouvel état de la simulation numérique. Cela peut s'effectuer grâce à des retours visuels, haptiques ou auditifs.

Fuchs *et al.* (2001) proposent un cadre théorique et méthodologique pour la création d'EV. Le modèle $3I^2$ (Figure 3.1), permet d'expliquer le fonctionnement de la RV selon trois niveaux de processus **d'Immersion et d'Interaction** (noté I^2). Le premier niveau constitue le lien entre l'Homme et la machine au niveau *physique* grâce à les I^2 *sensorimotrices*. Cela est mis en œuvre grâce à la partie logicielle, qui doit gérer en temps réel les entrées du système pour pouvoir réagir dans un intervalle convenable pour l'utilisateur. Puis le second niveau porte sur les I^2 *cognitives*, permettant à l'utilisateur de comprendre le monde virtuel. Les métaphores virtuelles ainsi que les Aides Logicielles Comportementales (ALC) permettent d'assister l'utilisateur dans ses actions. Par exemple Fuchs *et al.* (2001) illustrent les ALC par la mise en place d'un déplacement automatique lorsque l'intention de déplacement de l'utilisateur a été détectée par le système. Le troisième niveau concerne l'application virtuelle et correspond aux I^2 *fonctionnelles*. La finalité de cette dernière étape est de mettre en place une immersion de l'utilisation dans le monde virtuel, où l'utilisateur peut effectuer plusieurs activités qui sont qualifiées par Fuchs *et al.* (2001) comme des Primitives Comportementales Virtuelles (PCV). Il existe quatre catégories de PCV : (1) *observer le monde virtuel*, (2) *se déplacer dans le monde virtuel*, (3) *agir sur le monde virtuel* et (4) *communiquer avec autrui*. Cette approche théorique et pragmatique proposée par Fuchs *et al.* (2001) distinguent efficacement la partie opérative de la RV avec le premier niveau à propos des I^2 *sensorimotrices* et la partie cognitive, qui pour nos travaux de recherche, s'apparente aux éléments pédagogiques tels que les connaissances et compétences à inclure dans la situation virtuelle. Le travail des compétences peut être assisté par des métaphores au réalisme variable et également grâce à des aides supplémentaires, de manière à accompagner l'apprenant dans le dernier niveau qu'est le monde virtuel.

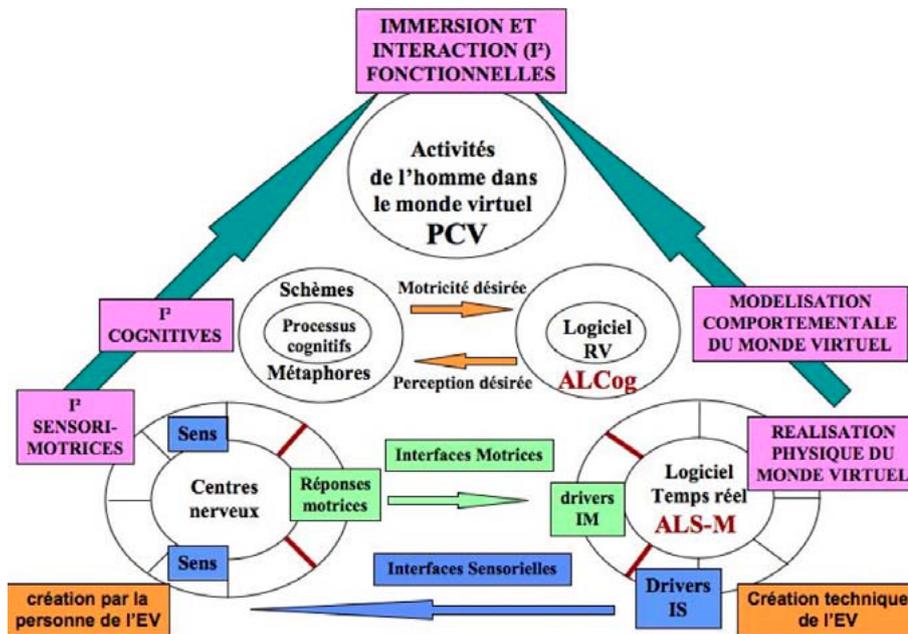


FIGURE 3.1 – Modèle technocentré des 3I² de Fuchs *et al.* (2001).

3.1.2 Caractéristiques fondamentales

Dans le milieu académique, la RV est souvent accompagnée d'une terminologie précise, parfois importée de la psychologie. En effet, les différentes notions liées à l'immersion ou encore la charge mentale sont issues de la psychologie, mais elles permettent d'expliquer certains phénomènes et comportements lors de l'utilisation de la RV. Nous allons donc dans cette sous-section, donner quelques définitions qui seront utilisées dans ce manuscrit :

- **L'immersion.** Il s'agit d'un terme dont la définition est souvent discutée dans la littérature, nous avons choisi d'utiliser la définition de Slater *et al.* (1995b). Selon les auteurs, l'immersion est dépendante du système utilisé, par conséquent, les capacités techniques de l'outil influencent directement la sensation d'immersion de l'utilisateur dans le monde virtuel. La fidélité visuelle ou auditive contribue donc grandement à la sensation d'immersion appliquée à l'utilisateur. Dans le cas de la RV, l'immersion est dépendante des paramètres techniques de dispositifs utilisés, tels que la résolution de l'affichage, le taux de rafraîchissement, etc. La fidélité de reproduction de la réalité est donc un élément clef dans la no-

tion d'immersion. Selon cette définition, l'immersion requiert une représentation de l'utilisateur dans le système virtuel, un corps virtuel (*Virtual Body, VB*) (Slater *et al.*, 1995b). Cela peut être une partie du corps, comme les mains. Il est accompagné d'une vue égocentrique afin de déclencher le sentiment d'immersion. L'immersion est un élément mesurable et quantifiable, notamment via des questionnaires, comme ceux proposés par Jennett *et al.* (2008).

- **La présence.** Il s'agit d'un terme de psychologie qui a été transcrit dans la RV et qui correspond à la sensation d'être présent physiquement et mentalement dans l'environnement virtuel (Slater et Usoh, 1993). L'idée sous-jacente à la présence est que plus un individu ressent de la présence, plus il agira de manière naturelle dans l'EV. Il y a aussi une dimension sociale à la présence, comme le rappelle Bulu (2012), cela correspond aux influences du moyen de communication utilisé pour les échanges entre plusieurs individus au travers du dispositif numérique. La présence peut se mesurer à l'aide de différents questionnaires, comme le rappellent Schwind *et al.* (2019) dans leur revue de littérature. Elle est par ailleurs régulièrement associée à l'immersion, dans Slater *et al.* (1995a) les auteurs comparent ces deux termes et statuent sur le fait que l'immersion est dépendante du système utilisé, alors que la présence correspond aux réponses émotionnelles et cognitives qui résultent de l'immersion. Ce lien entre immersion et présence a été étudié par Rose *et al.* (2018) qui ont comparé la présence subjective avec trois différents niveaux d'immersion (Figure 3.2) dans un contexte d'apprentissage. Cette étude porte aussi sur les relations entre la performance en EV et le degré d'immersion. Les auteurs concluent que dans le cas d'une tâche simple, l'immersion n'a pas d'influence significative sur la présence. Cette information est intéressante pour les concepteurs vis-à-vis de l'immersion graphique à introduire dans les scénarios virtuels.
- **Le flow.** Il s'agit d'une notion de psychologie introduite par Csikszentmihalyi (1990). Il s'agit d'un état dans lequel une personne se trouve lorsqu'elle est fortement impliquée dans une tâche ou activité, si bien que tout ce qui se trouve en dehors de cette activité n'est plus consciemment perçu. Par exemple, lorsqu'un apprenant est dans un état de *flow* alors qu'il réalise une tâche spécifique, il peut éventuellement perdre la conscience du temps qui passe. Dans le domaine de

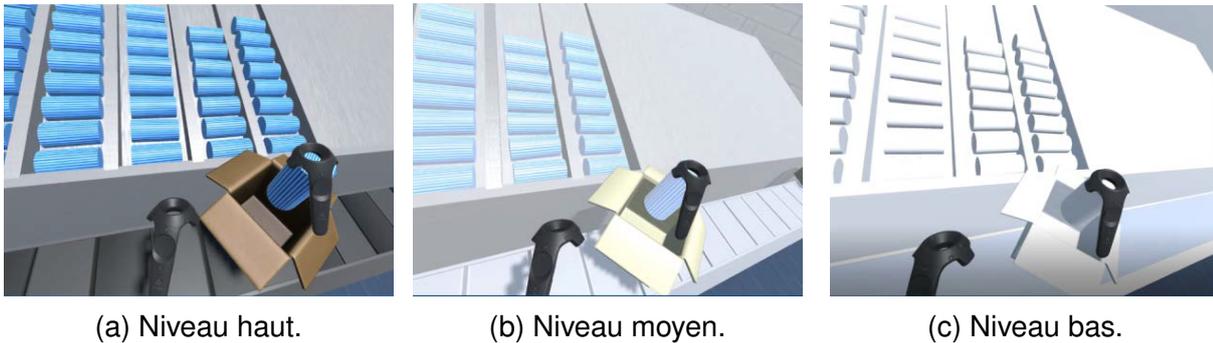


FIGURE 3.2 – Les trois niveaux d'immersion étudiés par Rose *et al.* (2018).

la RV ou des jeux vidéo, cette théorie du *flow* est souvent évoquée, car de nombreux joueurs ont déjà été dans cet état, où la perception du temps semble différente et/ou l'environnement direct est comme effacé pour n'entrevoir que l'application en cours d'utilisation.

- Les cybermalaises, aussi appelés *cybersickness* correspondent à une forme de cinétose amenée par l'utilisation d'un dispositif de RV comme les casques de RV. C'est une conséquence de l'immersion et de la présence. Les symptômes peuvent être des nausées, maux de tête, désorientation, perte de l'équilibre ou de la fatigue visuelle. Ce mal en RV est identifié depuis les débuts des dispositifs tels que les casques ou les CAVE, et sera toujours présent en raison de la nature même de la cinétose : l'information visuelle perçue par l'utilisateur entre en contradiction avec les signaux de l'oreille interne, ce qui cause une dissonance d'informations, donnant lieu aux symptômes évoqués plus tôt. Il s'agit du même phénomène que le mal des transports. Dans le cas de la RV, cette cinétose est souvent associée à la technique de navigation utilisée, car dans la réalité le système vestibulaire est stimulé lorsque l'on marche. Or en RV, ce système n'est pas forcément stimulé de la même manière en fonction de la technique de navigation utilisée. Le dispositif utilisé peut également avoir une influence, comme le montre Żukowska *et al.* (2019) qui ont comparé les symptômes de cybermalaises en fonction du casque de RV utilisé. D'autres paramètres peuvent influencer la présence ou non de cybermalaises, comme une latence élevée ou encore une immersion prolongée (Martirosov et Kopecek, 2017). Les cybermalaises sont quantifiables grâce à divers questionnaires

comme le *SSQ* (*Simulator Sickness Questionnaire*) (Kennedy *et al.*, 1993).

- **L'environnement virtuel.** Il s'agit du monde numérique dans lequel l'utilisateur évolue. Il est composé de modèles 3D manipulables ou non et également de comportements spécifiques propres à la situation virtuelle. Les EV peuvent être réalistes et reproduire fidèlement des situations réelles tant sur les comportements que visuellement. Cela peut également être des environnements symboliques permettant de visualiser des données abstraites ou alors des situations imaginaires qui ne sont pas présentes dans la réalité, mais cohérentes de par leurs implémentations.
- **Les interactions 3D** constituent l'ensemble des techniques et métaphores d'interaction permettant à l'utilisateur d'interagir avec l'environnement et les objets virtuels. L'interaction 3D repose sur l'utilisation (1) d'une interface motrice ou sensorimotrice (retour d'effort), (2) d'une interface sensorielle (principalement visuelle), et (3) d'un scénario d'interaction.
- **L'interfaçage comportemental**, regroupe l'ensemble des outils et matériels qui permettent à l'utilisateur de s'immerger physiquement dans l'EV. Cela inclut les contrôleurs, casques, capteurs de mouvements intégrés, etc.
- La charge mentale, aussi appelée charge cognitive, est une théorie selon laquelle un individu possède une quantité limitée de ressources cognitives, qu'il peut mobiliser lors d'une tâche. Il existe plusieurs approches et définitions de la charge mentale, qui sont détaillées dans un état de l'art réalisé par Verhulst (2019). Une capacité limitée des ressources cognitives implique que dans des situations qui mobilisent intensément l'esprit, certaines tâches ou actions ne peuvent pas être réalisées correctement, donnant possiblement lieu à des oublis, erreurs ou alors un temps de réalisation plus long. On comprend donc que cette notion soit importante dans un contexte de formation, d'autant plus lorsque l'on utilise la RV, étant donné que le participant, en plus de devoir réaliser une tâche d'apprentissage parfois complexe, doit maîtriser l'outil. De ce fait, si les techniques d'interaction 3D introduisent une charge mentale trop forte l'apprenant aura des difficultés à accomplir efficacement la tâche d'apprentissage. La

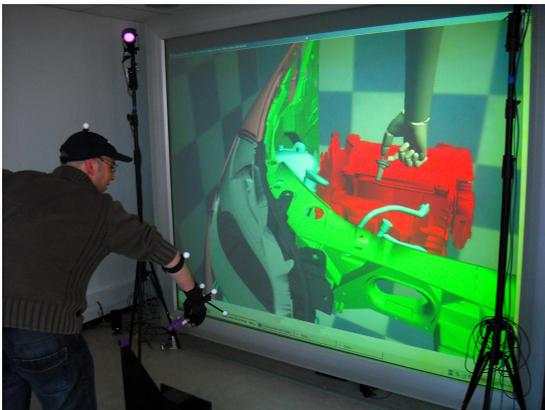
charge mentale est donc un élément important à considérer en RV.

3.2 Les outils d'immersion

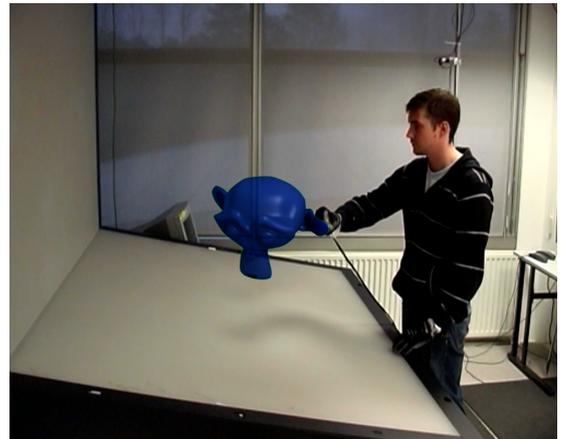
Plusieurs types d'interfaces permettent d'évoluer dans des EV avec différents degrés d'immersion. Le dispositif le plus répandu à l'origine est la configuration *desk-top*, c'est-à-dire qu'un écran est utilisé pour visualiser le monde virtuel, l'image est généralement 2D. Néanmoins, l'immersion liée à ce type d'usage est très faible, dans la mesure où l'écran peut être d'une petite taille et également en raison des périphériques d'entrée qui ne permettent pas des interactions impliquant le corps entier, se limitant à des interactions manuelles dans un espace relativement limité (ex. : Data-Glove, LeapMotion).

3.2.1 Outils semi-immersifs

D'après Chamaret (2010), une configuration semi-immersive implique un ou plusieurs écrans stéréoscopiques de grande dimension (Figure 3.3b). Les interactions s'effectuent grâce à des outils permettant un suivi de position dans l'espace (Figure 3.3a). Les dispositifs semi-immersifs peuvent être accompagnés de moyens à retours d'efforts pour simuler par exemple des contraintes sur les objets virtuels lors d'une sélection. Cette configuration est principalement mono utilisateur en raison des contraintes techniques que certains systèmes peuvent induire (ex. : présence d'un SPIDAR, stéréoscopie). Dans une configuration semi-immersive, le suivi de la tête est souvent présent, il s'agit d'une configuration tout à fait adéquate pour de la visualisation de pièce de dimension intermédiaire, comme un moteur numérisé. Dans certains dispositifs semi-immersifs, comme les plans de travail virtuels, des décalages entre l'espace de visualisation et de manipulation sont minimisés pour pallier des problèmes de perception du monde virtuel et d'interaction (Richard, 2011).



(a) Tâche de remplacement d'une lampe sur un bloc moteur en configuration semi-immersive (Chamaret, 2010).



(b) Utilisation d'un dispositif semi-immersif dans le cadre d'une tâche de manipulation (Veit *et al.*, 2009).

FIGURE 3.3 – Tâches virtuelles impliquant des dispositifs semi-immersifs.

3.2.2 CAVE

Dans ces travaux de thèse, nous avons ponctuellement utilisé un autre dispositif, le CAVE (*CAVE Autonomous Virtual Environment* (Cruz-Neira *et al.*, 1993)), ou vi-siocube. C'est un dispositif immersif fixe qui offre un champ de vision (*Field of View, FoV*) important vis-à-vis des écrans classiques et des solutions semi-immersives. Il est composé d'une structure comportant plusieurs écrans sur lesquels sont projetées des images en trois dimensions stéréoscopiques. Ces dispositifs sont très utilisés dans l'industrie de pointe, essentiellement pour effectuer de la revue de projet ou de la visualisation de pièces en 3D en temps réel pour du prototypage.

La configuration du CAVE peut varier suivant les usages et les fabricants. Dans le cadre de nos travaux de thèse, nous avons utilisé le CAVE de DEC Industrie (Figure 3.4). Il est composé de cinq écrans de projection. Un en face de l'utilisateur, un à gauche, droite, en bas, et une petite partie supérieure appelée *la casquette*. L'utilisateur est au centre du système avec des lunettes 3D stéréoscopiques actives. Cela permet à la personne en immersion de percevoir la profondeur des images projetées sur les écrans. La 3D est adaptée à la position de l'utilisateur grâce à un système de *tracking* de manettes et des lunettes, permettant en plus d'adapter la 3D de faire des interactions dans l'application virtuelle. Comme pour certains dispositifs semi-immersifs,

les visiocubes peuvent également comporter des décalages entre l'espace de visualisation et l'espace de manipulation, rendant parfois certaines interactions de précision complexes à réaliser.

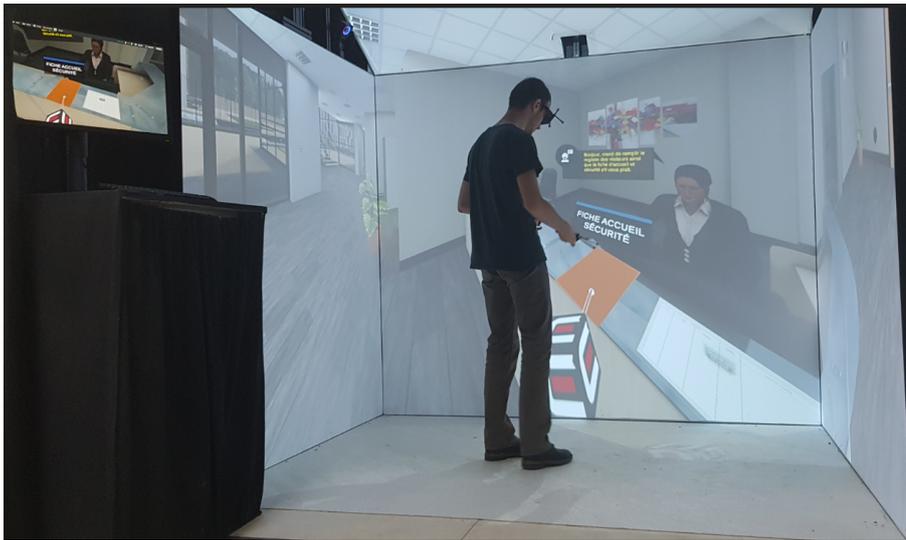


FIGURE 3.4 – Utilisateur en immersion dans un CAVE.

3.2.3 Casques de RV

Les casques de réalité virtuelle autorisent un champ de vision de 360° garantissant ainsi une immersion visuelle totale dans le monde virtuel. Ce type de dispositif est également nommé par son appellation anglaise, *Head-Mounted Display (HMD)*, ou encore dans Fuchs (2016), des visiocasques, qui est un terme plus neutre et qui correspond aussi aux premières traductions françaises du terme *HMD*. Actuellement, nous pouvons citer trois types de casques qui sont les plus répandus :

- L'Oculus Rift (Rift CV1, Rift S) (Figure 3.5b)².
- Le HTC Vive / Valve Index (Figure 3.5a)³.

2. <https://www.oculus.com/rift-s>

3. <https://www.vive.com/fr/>

— Les casques de réalité mixte de Microsoft (Figure 3.5c)⁴.

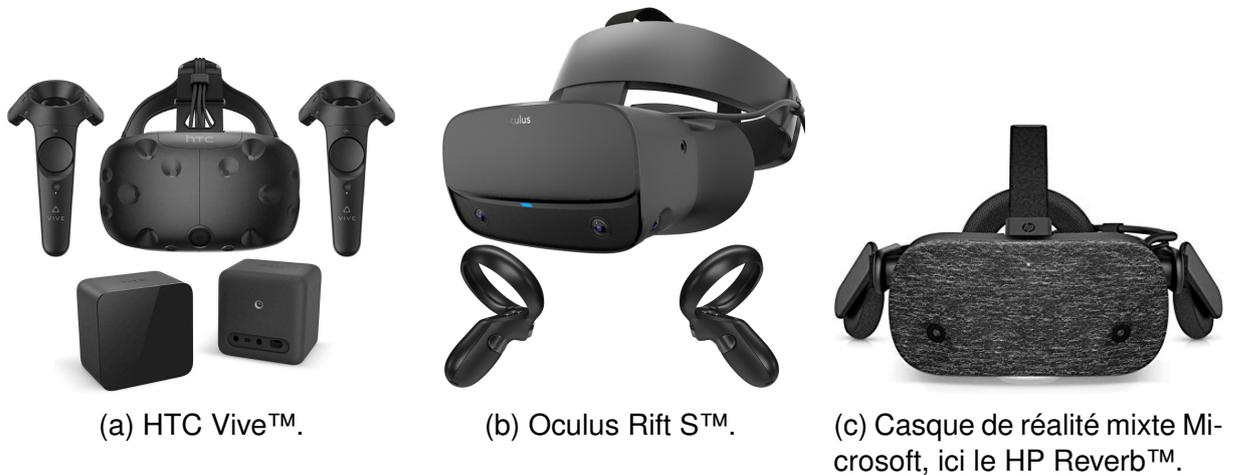


FIGURE 3.5 – Casques de réalité virtuelle commerciaux.

Un casque de RV est un système portable qui permet d'afficher un EV grâce à un système d'image stéréoscopique. C'est-à-dire que le casque va afficher une image différente sur l'œil gauche et l'œil droit. En plus de cette partie visuelle, les *HMD* modernes contiennent d'autres capteurs tels que des accéléromètres, gyroscopes ou encore des dispositifs de suivi oculaires (*eye tracking*). Cette myriade de capteurs permet d'assurer un suivi en temps réel de la position ainsi que de l'orientation du casque dans l'espace. Les visiocasques récupèrent la position réelle de l'utilisateur et envoient ces données à l'application pour retranscrire le point de vue réel dans l'environnement virtuel. Contrairement au CAVE et aux dispositifs semi-immersifs, il n'y a pas de décalage entre les espaces de visualisation et de manipulation. Cela est rendu possible grâce à des systèmes de suivi de position (*tracking*), qui peut être soit intégré au visiocasque, soit dépendant d'équipement externe comme pour le HTC VIVE. Pour une utilisation en contexte pédagogique, les solutions intégrant le *tracking* directement au casque sont particulièrement intéressantes. Surtout si l'équipement doit changer de salle en fonction de l'emploi du temps des élèves, car la mise en route est très rapide.

Il existe une autre catégorie de casques de RV, les casques dits *autonomes*. Il s'agit de visiocasques sans fils, qui ne requièrent pas de connexion directe à un ordinateur. Il est possible de distinguer deux types de casques autonomes : (1) ceux

4. <https://www.microsoft.com/fr-fr/windows/windows-mixed-reality>

utilisant un *smartphone* comme unité de calcul et d'affichage. Nous pouvons citer le *Google Cardboard*⁵ ou encore le *Samsung GearVR*⁶; (2) ceux embarquant un système Android avec son propre système de rendu et de calcul comme l'*Oculus Quest* ou le *Vive Focus*. Ces casques sont très mobiles et disponibles à des tarifs attractifs comparés aux solutions filaires, ce qui rend cette solution intéressante pour des usages pédagogiques dans les établissements scolaires. En revanche, la puissance de ces visiocasques est moindre que les équivalents filaires et demandent une approche différente de programmation, ce qui a pour effet de rendre pour le moment, ces approches peu intéressantes lorsque l'on souhaite digitaliser des situations de formation complexes d'un point de vue visuel et interactif. C'est pourquoi dans le cadre de cette thèse, nous avons préféré nous orienter vers les solutions filaires classiques et laisser l'utilisation de ces casques autonomes pour plus tard.

3.3 Techniques d'interaction

Quelle que soit la définition de la RV, le dispositif implique l'utilisation d'interactions. Une technique d'interaction consiste en une action de la part de l'utilisateur, qui vient influencer l'activité virtuelle. Il existe plusieurs méthodes d'interactions, comme les actions sur la manipulation d'objets virtuels telles que décrites par Mine (1995) ou Bowman *et al.* (1997). Avec l'apparition des premiers dispositifs immersifs s'est posée la question des interactions avec les objets virtuels. Il s'agit notamment de définir comment l'utilisateur peut prendre en main un objet qui est présent dans l'espace tridimensionnel.

Pour Bowman *et al.* (2001), il est possible de regrouper les techniques d'interaction en plusieurs catégories :

- **La navigation.** Correspond à l'ensemble des techniques permettant à l'utilisateur de se mouvoir au sein de l'EV.

5. <https://arvr.google.com/cardboard/>

6. <https://www.samsung.com/fr/wearables/gear-vr/>

- **La sélection et manipulation.** Il s'agit de l'ensemble des techniques permettant à l'utilisateur d'accomplir trois tâches essentielles : la sélection, le positionnement et la rotation d'objets.
- **Le contrôle d'application.** Il s'agit des actions qui permettent d'agir sur l'ensemble de l'application. Le contrôle d'application peut comporter les menus graphiques, des commandes vocales pour agir sur l'application ou des interactions gestuelles, ou encore des outils aux fonctions explicites.

Cette taxonomie est souvent utilisée, et nous avons fait le choix dans ce manuscrit de séparer les interactions en fonction de ces catégories. Le contrôle d'application tel que définie par Bowman *et al.* (2001) englobe selon nous trop d'éléments, par conséquent, nous allons faire le choix dans ce manuscrit de distinguer plusieurs types de contrôle d'application afin de ne pas mélanger des actions trop différentes. Il y a la gestion des paramètres de l'application, les éléments agissants sur la variabilité pédagogique ou encore les assistances virtuelles.

3.3.1 La navigation en environnement virtuel

La navigation en EV est un élément régulièrement étudié depuis les débuts de la RV. En 1997, Bowman *et al.* (1997) s'intéressaient déjà aux différentes techniques ainsi qu'aux apports de chacune d'entre elles, notamment en proposant différents facteurs pour qualifier les techniques en contexte virtuel. Boletsis (2017) procède à une revue de littérature à propos des différentes méthodes de locomotion en EV. Ils proposent une taxonomie à propos de ces techniques (Figure 3.6).

Le type de mouvement est pris en considération dans cette taxonomie (*VR motion type*), c'est-à-dire qu'une distinction est faite entre les déplacements dits « continus » et « non continus ». Les premiers correspondent à des mouvements fluides et continus, on y retrouve des techniques de locomotion comme la translation ou encore la marche réelle. La seconde catégorie caractérise les déplacements instantanés comme la téléportation. La translation est un déplacement déclenché par l'utilisateur, généralement en agissant sur le *joystick* du contrôleur. Le point de vue de l'utilisateur est donc trans-

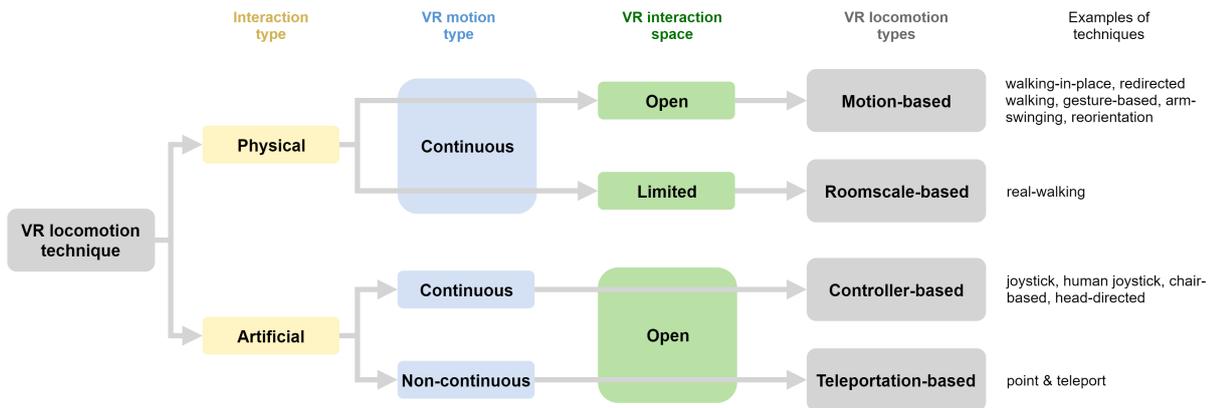


FIGURE 3.6 – Typologie de Boletsis (2017).

laté dans la direction du *joystick*. Cependant, cette technique est souvent associée à une présence de cybermalaises (Coomer *et al.*, 2018; Monteiro *et al.*, 2018; Mayor *et al.*, 2019). La marche réelle consiste à déplacer la représentation virtuelle de l'utilisateur en accord avec ses déplacements dans le monde réel. Cela est rendu possible grâce aux techniques de suivi de position (*tracking*) disponibles avec les casques de RV récents. Cette technique est utile pour ajuster précisément l'orientation et la position de l'utilisateur dans l'EV. En revanche, la limitation principale réside ici dans l'espace physique dans lequel l'utilisateur peut évoluer dans le monde réel. L'espace de *tracking* est limité, il est donc judicieux de combiner cette méthode continue avec une autre technique de locomotion.

Concernant téléportation, il s'agit de déplacer instantanément un utilisateur de son emplacement actuel vers un endroit ciblé grâce aux contrôleurs. Cette technique est utilisée dans les applications récentes de RV, car elle permet un déplacement rapide en comparaison des techniques continues comme la translation. Bien qu'il soit possible d'augmenter la vitesse de translation, cela peut être la source de cybermalaises (Martirosov et Kopecek, 2017) alors que la téléportation permet une réduction des cybermalaises (Christou et Aristidou, 2017; Checa et Bustillo, 2020), au détriment d'une présence réduite (Bowman *et al.*, 1997). Il existe plusieurs méthodes d'implémentation de la téléportation, comme l'approche *Point & Teleport* (Bozgeyikli *et al.*, 2016) qui permet grâce à un lancé de rayon de déplacer instantanément l'utilisateur. Les auteurs évoquent également l'importance de développer une technique qui soit intuitive et fa-

cile d'utilisation. Funk *et al.* (2019) proposent plusieurs méthodes d'implémentation de la téléportation, notamment à propos de plusieurs formes de rayon (approche linéaire ou parabolique). Ces détails d'implémentation s'avèrent intéressants en raison de leur impact sur l'utilisabilité de la technique auprès des utilisateurs.

Les différentes méthodes d'implémentation de la navigation sont à prendre en compte dans un contexte de formation. En effet, il faut réduire les sensations de cybermalaise et rendre la prise en main rapide afin de ne pas nuire à la performance de l'apprenant. Il faut également une technique autorisant les apprenants à se déplacer rapidement, de manière à concentrer le temps virtuel sur l'activité pédagogique. De ce fait, la téléportation se trouve être une méthode pertinente pour un usage en formation (Kaddour *et al.*, 2020; Taupiac, 2018). Cela en raison du gain de temps lié aux déplacements instantanés, de même que cette technique n'impose pas la présence de *joystick* sur les contrôleurs. Un seul bouton est nécessaire à la mise en place de cette technique, simplifiant ainsi la prise en main. De plus, il est possible d'introduire des retours visuels et haptiques aisément compréhensibles par l'apprenant (Funk *et al.*, 2019; Bozgeyikli *et al.*, 2016), comme le tracé du rayon ou l'estimation de la destination de téléportation. Par conséquent, une approche combinant la téléportation et la marche réelle semble plus pertinente pour un usage en formation. C'est par la suite au concepteur de choisir une implémentation de la téléportation qui convienne au contexte pédagogique.

3.3.2 La sélection et manipulation en environnement virtuel

Dans le monde virtuel, en plus de se déplacer il faut que l'utilisateur puisse agir sur les objets de l'environnement. Une possibilité consiste à utiliser le *RayCasting* (Bowman et Hodges, 1997). Sur la main virtuelle de l'utilisateur, un rayon est tiré dans une direction précise. Lorsque le rayon en question entre en collision avec un objet, alors l'utilisateur peut interagir avec. Cette métaphore est très utilisée de nos jours en RV pour plusieurs raisons. Tout d'abord, elle est assez simple à implémenter informatiquement. Ensuite, il est aisé pour un utilisateur novice de comprendre son fonctionnement, grâce à un retour visuel du rayon. Le *raycasting* s'intègre dans les techniques dites de *sélection* (Mine, 1995; Bowman *et al.*, 2001). Il existe d'autres méthodes de sélection

d'un objet dans le monde virtuel, comme la sélection avec le regard (Kevin *et al.*, 2018; Nukarinen *et al.*, 2018), qui consiste à sélectionner un objet après l'avoir regardé pendant un certain temps. Il y a deux possibilités pour mettre en place la sélection par le regard. Soit le système est équipé d'un *eye tracker* permettant d'avoir précisément le regard de l'utilisateur, soit le développeur définit un point de focalisation en fonction de l'orientation de la caméra virtuelle. Dans ce second cas, on parle alors plus de sélection par l'orientation de la tête et non du regard.

Une autre méthode de sélection consiste à indiquer au système l'objet à sélectionner à l'aide de la voix de l'utilisateur, grâce à de la reconnaissance vocale (LaViola, 2000). L'utilisateur exprime à l'oral le nom de l'objet souhaité et la machine effectue la sélection en fonction de l'entrée de l'utilisateur.

La sélection en environnement virtuel est un élément complexe à mettre en place et doit être murement réfléchi, car cela influence toute l'expérience utilisateur. La finalité de la situation virtuelle doit être prise en compte au moment de choisir une technique plutôt qu'une autre. En fonction des besoins de l'application virtuelle, il faut s'orienter vers une technique particulière. Dans les travaux de Navarre *et al.* (2005) les auteurs ont mis en place un jeu d'échecs virtuel. Afin de pouvoir déplacer les éléments du jeu, les auteurs ont utilisé la technique dite de la main virtuelle (*virtual hand*). Cette technique égocentrique permet à l'utilisateur de prendre de manière réaliste une pièce du jeu et de la déplacer sur le plateau du jeu grâce à un gant à retour haptique. La métaphore virtuelle est donc la même qu'en réel. Cette technique s'inscrit dans la catégorie des *grab techniques* telles que définies par Bowman et Hodges (1997). Ce terme de manipulation par *grab* est aussi beaucoup employé par les jeux vidéo récents utilisant les nouveaux casques de réalité virtuelle. Dans le milieu du développement informatique, on privilégie ce genre d'interaction lorsque l'on souhaite atteindre un haut niveau de fidélité d'interaction. Prendre un objet avec une main virtuelle qui suit la position de la main réelle tend à être plus réaliste que la métaphore du *raycasting*. De nouveaux dispositifs tels que le *LeapMotion*⁷, *Kinect*⁸ ou encore les casques autonomes *Oculus Quest* permettent un *tracking* précis de la main de l'utilisateur, permettant ainsi des interactions fidèles et proches de la réalité. Wu *et al.* (2019) proposent d'utiliser la

7. <https://www.ultraleap.com>

8. <https://en.wikipedia.org/wiki/Kinect>

reconnaissance des gestes afin de mettre en place des techniques d'interaction. Les auteurs proposent même un ensemble de gestes définis par les utilisateurs afin de garantir une meilleure utilisabilité.

Dans une situation de formation professionnelle virtuelle, l'utilisation du *grab*, bien que proche du réel, peut ne pas être adaptée. En effet, une activité pédagogique virtuelle n'a pas pour vocation de simuler une gestuelle précise, cela peut être réalisé plus aisément en réel. Au contraire, en raison de la précision des systèmes de *tracking*, la position des mains peut être faussée, ce qui peut être problématique pour des gestes précis, notamment lors d'interactions avec des machines industrielles. De plus, les interactions sur des petits objets sont plus complexes à réaliser en *grab* qu'à l'aide d'un *raycast*, car la représentation virtuelle de la main peut cacher l'objet sélectionné. Par ailleurs, si plusieurs objets se trouvent dans la zone d'interaction du *grab*, alors l'application peut ne pas être en mesure de déterminer quel objet doit être sélectionné, mettant ainsi l'utilisateur en défaut. Enfin, les interactions *grab* nécessitent, pour être pertinentes d'un point de vue immersif, des retours d'efforts réalistes, comme des retours haptiques localisés précisément sur les mains de l'utilisateur en fonction du point de contact dans l'EV. Avec des gants à retour d'efforts cela est possible, mais avec les contrôleurs des casques de RV récents ou avec les approches de *tracking* des mains, les retours haptiques sont peut pertinent, voire inexistant.

Dans la taxonomie de Bowman *et al.* (2001), la sélection est aussi couplée aux différentes techniques de manipulation. La manipulation intervient après la sélection, il s'agit des étapes qui impliquent l'aspect fonctionnel de l'objet sélectionné ou tout simplement du placement d'objet dans l'espace. Différentes techniques sont étudiées dans l'article de Bowman et Hodges (1997). Les manipulations peuvent aussi être assistées comme expliquées dans Goesele et Stuerzlinger (1999) où le placement d'objets dans la scène virtuelle est contraint par des règles spécifiques. La manipulation d'un objet virtuel est conditionnée au degré de réalisme et au contexte que l'on souhaite introduire en RV. Par exemple, pour manipuler une vis à l'aide d'un tournevis, il y a deux approches majoritaires. Soit l'utilisateur mime le geste réel pour effectuer l'action, soit l'utilisateur clique à l'aide d'une technique de sélection telle que le *raycasting* pour dévisser automatiquement la vis. Ces différentes approches de réduction de la complexité d'une tâche, l'étayage (sous-section 4.1.2), sont primordiales dans un contexte

de formation professionnelle, et toutes les manipulations doivent être réfléchies afin d'être le plus optimales possible.

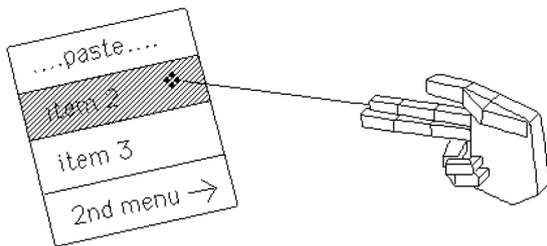
3.3.3 Contrôle d'application

Le contrôle d'application tel que définit par Bowman *et al.* (2001) englobe toutes les actions qui contribuent à changer l'état du système. Par conséquent il existe une multitude de métaphores permettant de mettre en place cela. Communément, il s'agit des interfaces graphiques permettant d'agir sur l'ensemble de la simulation comme les options et les paramètres du système. D'autres métaphores que les interfaces graphiques sont possibles comme le *Command & Control Cube* de Grosjean et Coquillart (2001). Bowman *et al.* (2001) explique que dans les environnements virtuels, les interfaces dites *classiques* sont difficilement utilisables, en partie à cause de la nouvelle dimension (3D) que le système virtuel introduit. De ce fait, les techniques d'interaction habituelles peuvent être difficiles à utiliser.

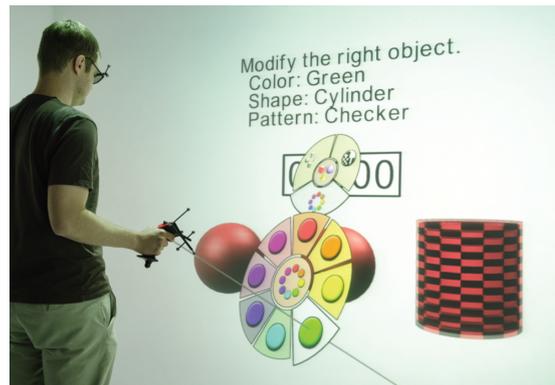
Dans le cas de la RV appliquée à la formation professionnelle, il est parfois nécessaire de donner à l'apprenant des informations complémentaires pendant la réalisation de l'activité. Ces dernières doivent pouvoir être transmises sans que l'apprenant ait besoin de sortir de l'EV et/ou de briser l'immersion en enlevant, par exemple, le casque. Pour transmettre des informations via l'EV mais également mettre en place un moyen d'action de la part de l'apprenant sur l'application. Pour ce faire, des interfaces utilisateurs (User Interface (UI)) sont généralement utilisées, il peut s'agir de textes flottants dans le monde virtuel, ou alors de menus affichant diverses informations.

Les interfaces peuvent être classées en deux grandes catégories : les UI 2D et les UI 3D. La première catégorie contient les interfaces conventionnelles que nous avons tous l'habitude d'utiliser, quel que soit le support. Il s'agit des interfaces proposées dans les navigateurs internet, ou encore les logiciels de traitement de texte. Ces interfaces existent dans un repère 2D et sont affichées sur ce que l'on appelle communément un périphérique d'affichage, classiquement un écran d'ordinateur ou un *smartphone* (Davis *et al.*, 2016). L'autre catégorie regroupe celles qui sont intégrées aux mondes virtuels (Figure 3.7) (Monteiro *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2017). Il s'agit

d'objets virtuels disposés dans l'espace avec une position et une orientation précise. L'utilisateur est capable de distinguer ces interfaces dans le monde virtuel, mais il est aussi possible qu'il ne puisse pas les percevoir correctement ces dernières en raison de sa position ou des obstacles visuels qui se trouvent entre l'interface et lui (Jacoby et Ellis, 1992).



(a) Exemple d'interface virtuelle 3D décrite par Jacoby et Ellis (1992). Une sélection à base de *raycast* est utilisée pour sélectionner les différents éléments du menu.



(b) Utilisation d'une interface dans le repère 3D à l'aide d'un *raycast* dans un CAVE (Gebhardt *et al.*, 2013).

FIGURE 3.7 – Utilisation d'interfaces dans le repère 3D.

Utiliser des interfaces 3D dans le monde virtuel est pertinent d'un point de vue de la cohérence du monde, en revanche, il convient au concepteur de bien choisir l'emplacement des composants d'interface. Rzayev *et al.* (2019) se sont intéressés aux différents placements d'interfaces 3D dans le monde. Ils ont mis au point quatre techniques d'affichage de notifications dans le monde virtuel : affichage tête haute (*Head Up Display (HUD)*), sur un mur (*In-Situ*), flottant (*Floating*), ou lié à l'utilisateur (*On-Body*) (Figures 3.8). Trois tâches sont mises en place afin de quantifier le temps de réponse, la quantité de notifications manquées ainsi que la distance entre l'utilisateur et l'UI au moment de répondre. Les résultats expérimentaux de cette étude indiquent que les affichages *HUD* (affichage tête haute, *Head Up Display*) sont plus intrusifs et distrayants, alors que les notifications affichées sur les murs sont plus souvent omises par les participants, diminuant ainsi le facteur de perception de l'interface. Les modalités flottantes et sur la main de l'utilisateur ont été les techniques préférées des participants. Chaque technique possède donc selon les auteurs différents avantages

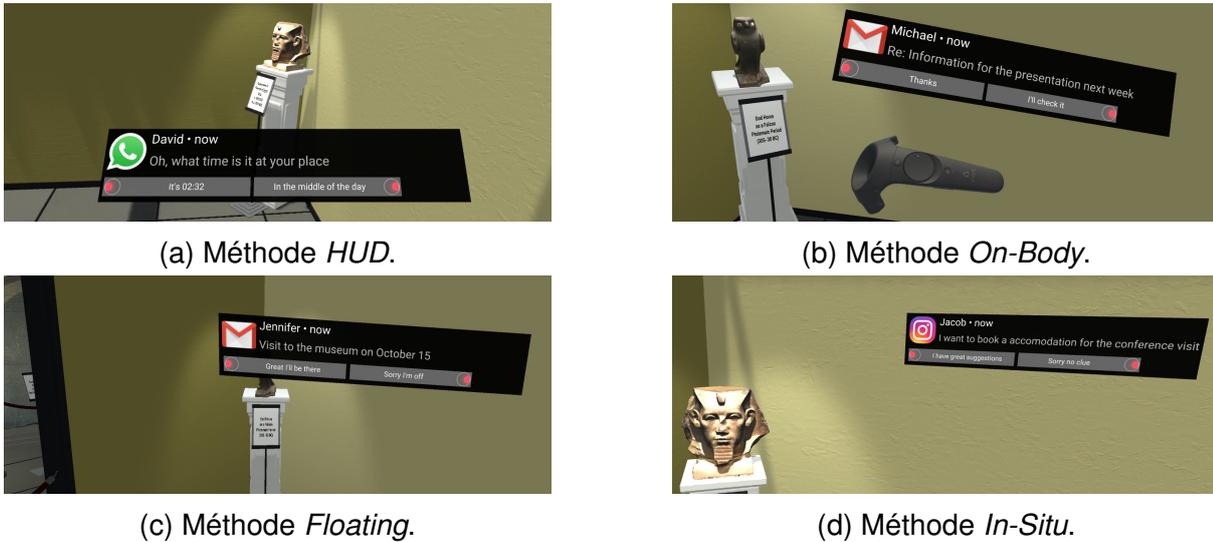


FIGURE 3.8 – Notifications 3D décrites dans Rzayev *et al.* (2019).

et désavantages, ils mettent donc en avant différentes situations dans lesquelles les modalités de notifications étudiées peuvent être utiles (Tableau 3.1). En fonction du contexte, le placement de l'UI peut être bénéfique ou, au contraire, néfaste pour l'utilisateur (Rzayev *et al.*, 2019).

Méthode	Contexte d'utilisation
Notifications tête haute	Le placement étant le plus intrusif, il faut utiliser ces interfaces que pour les messages critiques ou urgents.
Notifications fixes	Ces notifications sont les moins visibles, car à des positions et orientations fixes dans l'EV. Il est donc préférable d'y afficher uniquement des informations non essentielles qui ne gênent pas la réalisation de l'activité si elles ne sont pas lues.
Notifications flottantes et liées à l'utilisateur	Les informations affichées avec cette méthode sont celles qui sont les mieux comprises par les utilisateurs. Les informations générales doivent donc être affichées de cette façon. Il faut cependant donner la possibilité à l'utilisateur de gérer ou filtrer les messages afin de pouvoir organiser les informations.

TABLEAU 3.1 – Recommandations d'implémentation des messages en RV par Rzayev *et al.* (2019).

Les interfaces utilisateurs 3D sont des moyens efficaces pour donner des informations complémentaires à l'utilisateur. Ces dernières peuvent afficher des informations à propos de l'activité, des objets présents dans l'EV ou encore sur l'utilisation de l'outil (ex. : aides pour utiliser les manettes). Il existe plusieurs méthodes d'affichage et pour une utilisation pédagogique de la RV, il faut veiller à ne pas surcharger l'apprenant d'informations, sans quoi cela peut impacter négativement sa performance dans

le monde virtuel en raison d'une charge mentale plus élevée. Il faut également que l'interface 3D soit cohérente dans le contexte virtuel simulé, de manière à ne pas nuire à l'immersion de l'utilisateur. En effet, la présence d'interfaces 3D n'est pas naturelle et il faut s'efforcer de limiter les usages peu réalistes de ces dernières. Les méthodes décrites par Rzayev *et al.* (2019) ont toutes leur place dans un contexte professionnel. L'approche *HUD* est pertinente pour afficher des alertes ou des messages critiques, comme un départ d'un incendie ou alors une mauvaise consignation d'une armoire électrique. L'aspect ponctuel de cette approche renforce l'importance des messages utilisant la méthode *HUD*. Les interfaces qui s'ancrent dans le monde virtuel sont également pertinentes pour afficher des éléments à propos de la navigation ou encore lors de l'utilisation de guides virtuels. Par exemple, lors d'une activité guidée, il est intéressant de placer une interface expliquant l'action à réaliser au-dessus de l'objet interactif concerné (Yanchapanta *et al.*, 2019). En revanche, cette approche n'est pas égocentrique, il faut donc limiter les messages importants dans le cas où l'utilisateur peut ne pas voir l'interface (ex. : affichage de l'interface dans une autre pièce de l'EV). Enfin, les informations générales telles que les consignes ou la consultation de documents nécessaires à la réalisation de l'activité pédagogique peuvent utiliser la méthode *On-Body*, qui autorise à l'utilisateur une consultation quand il le souhaite des informations présentes sur cette interface.

3.4 Aides virtuelles

3.4.1 Guides virtuels

Nous avons évoqué dans le premier chapitre la présence d'un assistant virtuel dans la publication de Wasfy *et al.* (2005). Cet assistant sert à indiquer à l'utilisateur la bonne procédure à suivre pour opérer sur la machine à commande numérique (CNC). Il s'agit là d'une alternative plus interactive à la consigne orale ou écrite. Globalement, les assistants virtuels sont régulièrement décrits et étudiés dans la littérature scientifique. En condition d'apprentissage, l'élève a parfois besoin d'aide pour réaliser une tâche pédagogique. Tout d'abord, la consigne doit être claire pour qu'il sache quoi faire. La réalisation de la tâche peut également poser des problèmes. Enfin, dans le cas de la RV, des difficultés peuvent survenir avec les contrôleurs ou les interactions virtuelles par

exemple. Nous pouvons aussi avoir des demandes d'aides plus générales où l'élève manque de connaissances à propos du contexte (ex. : pourquoi?, comment?). Par exemple cela peut être une question comme : « *Pourquoi je dois consigner le disjoncteur avant de réparer une prise électrique ?* ». Pour répondre à ces questions, l'humain est nécessaire, c'est-à-dire que l'enseignant va écouter la question/remarque et prendre le temps d'y répondre pour permettre à l'apprenant de continuer l'activité pédagogique. La RV n'a pas pour objectif de remplacer l'enseignant, au contraire, il faut donner une place importante à ce dernier dans le système, de manière à rendre l'utilisation de la RV complémentaire des méthodes d'enseignement présentes en formation professionnelle.

Pour garantir une expérience optimale, une application doit pouvoir s'adapter au profil de l'utilisateur. Cependant, même avec une bonne adaptation et une consigne claire, il est parfois justifié de rajouter des éléments supplémentaires pour accompagner l'apprenant. De la même manière que les *prompts* (Bannert, 2009), il est intéressant de mettre à disposition des élèves des moyens d'autorégulation.

Les guides virtuels (*virtual fixtures*, Rosenberg (1992, 1993)) ont pour but d'assister l'utilisateur lors de la réalisation d'une action. De multiples méthodes de guides virtuels existent et ils sont à utiliser en fonction du contexte. Cela peut être un changement de couleur pour indiquer un placement valide ou non (Richard, 2011). C'est notamment utile lors d'une tâche de sélection, où l'utilisateur est informé de l'état de sélection d'un objet par un changement de couleur (Muller, 2019). Plusieurs types de guides virtuels existent et certains d'entre eux sont formalisés dans les travaux de Otmane (2000) à propos du télétravail robotisé. Par exemple les guides virtuels peuvent être passifs ou actifs (Otmane, 2000). Selon Otmane (2000), « *un guide est dit passif lorsque son utilisation est limitée à l'assistance à la perception sur l'opérateur* » alors qu'un guide actif a une influence réelle sur le robot ou son environnement. D'autres guides sont ainsi décrits comme le guide répulsif (Figure 3.9) qui a pour effet d'empêcher le robot d'entrer dans la zone couverte par le guide virtuel. L'auteur détaille également un formalisme pour la classification des guides virtuels, il est d'ailleurs envisageable d'utiliser ce formalisme pour qualifier les guides et informations visuelles présentes dans les EV.

Dans son ouvrage, Fuchs (2016) définit par ailleurs les Aides Logicielles Cogni-

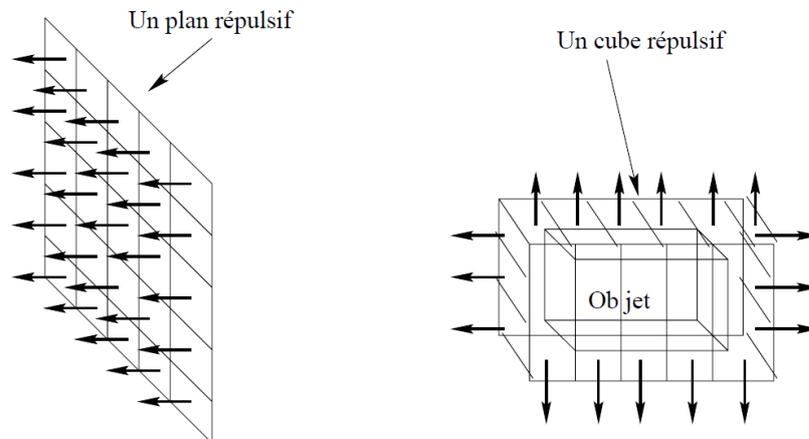


FIGURE 3.9 – Illustration d'un guide virtuel répulsif (Otmane, 2000).

tives (ALCog) comme étant des aides qui « *apportent des facilités au sujet lors de la réalisation d'une tâche à accomplir* ». Il sépare ces aides en deux catégories, la première regroupe des aides venant **palier aux incohérences sensorimotrices**. L'auteur donne l'exemple d'une manipulation d'un objet en utilisant un dispositif sans retour d'effort. La seconde catégorie repose sur les aides à apporter à l'utilisateur pour **réaliser une tâche**.

Dans une approche pédagogique de la RV, les ALCog ainsi que les guides virtuels sont pertinents pour l'utilisateur, car cela permet de l'assister, évitant ainsi les situations de blocages. Par exemple un guide actif peut être utilisé pour aider l'apprenant à placer une pièce dans une machine ou encore cela peut être la mise en surbrillance d'un élément important du scénario pédagogique. Ces aides logicielles peuvent également être paramétrées en fonction du niveau de l'apprenant, ce qui rend possible une activation des guides en fonction du niveau de l'élève qui réalise l'activité pédagogique virtuelle.

3.4.2 Agents pédagogiques virtuels

Un avatar, ou agent pédagogique est une représentation numérique d'un humain. Plusieurs approches sont possibles, cela peut être un assistant représenté en deux di-

mensions présent dans un coin de l'écran (Lester *et al.*, 1997; Wasfy *et al.*, 2005; Jin, 2010). Il peut également s'agir d'un modèle tridimensionnel représentant un humain complet (Barthes *et al.*, 2018; Johnson et Rickel, 1997). Cette représentation humanoïde permet de simuler des interactions plus naturelles, plus *humaines*.

Ces agents pédagogiques virtuels (*Pedagogical Virtual Agent (PVA)*) sont des assistants incarnés qui ont pour rôle d'assister l'utilisateur dans la situation immersive. Afin de mettre en place une assistance, les agents doivent comporter un certain degré d'autonomie et d'adaptabilité pour réagir convenablement aux actions de l'utilisateur (Johnson et Rickel, 1997). Le but de cette interaction avec l'apprenant est de pouvoir l'aider lorsqu'il rencontre une difficulté, de le guider, ou encore de lui donner des informations complémentaires à propos d'un élément précis de l'EV. Pour que ces interactions entre l'agent et l'utilisateur soient pertinentes, il convient de donner un semblant de personnalité à l'agent (Ryu et Baylor, 2005). Notamment grâce à des facteurs précis tels que l'apparence humaine, la crédibilité, les qualités pédagogiques ou encore l'impact sur la motivation de l'apprenant (Ryu et Baylor, 2005). La motivation induite par l'agent est un élément clef pour une intégration cohérente dans l'EV (Jin, 2010; Zipp et Craig, 2019; Kim *et al.*, 2007; Sklar et Richards, 2010). Il revient au concepteur de définir les bons degrés d'autonomie et d'intelligence pour rendre l'agent adapté à la situation virtuelle.

Il existe également des systèmes multiagents, qui mettent en situation plusieurs agents autonomes qui réalisent des tâches dans l'EV. Le rôle ici des agents n'est plus d'aider exclusivement l'utilisateur, mais de contribuer également à des actions précises dans le monde virtuel de manière à rendre ce dernier plus pertinent. Par ailleurs, cela permet la création d'activités pédagogiques plus riches. Dans ces situations, la collaboration entre les agents est possible, renforçant la crédibilité du monde virtuel. La suite logicielle HUMANS (Lanquepin *et al.*, 2013) ou MASCARET (Buche *et al.*, 2004) sont des exemples d'approches génériques multiagents. Les situations multiagents sont pertinentes dans des scénarios virtuels de gestion de crise impliquant plusieurs protagonistes, comme le projet VICTEAMS⁹ (Huguet *et al.*, 2017). Ou encore dans des situations où de la collaboration entre l'utilisateur et les agents est nécessaire.

9. <https://victteams.hds.utc.fr>

Dans notre cas d'étude, nous avons fait le choix de ne pas utiliser les agents pédagogiques virtuels. En formation professionnelle, les agents peuvent dans certaines situations ne pas être adaptés. Par exemple dans des activités dangereuses, l'apprenant peut être amené à être seul dans la zone d'activité (Figure 3.10). De ce fait, pour accéder aux informations que dispose l'agent, l'apprenant doit quitter la zone de travail pour aller voir l'agent. Ce qui est peu pertinent d'un point de vue pédagogique. Dans certaines activités pédagogiques, il faut également veiller à ce que l'agent ne gêne pas l'apprenant par exemple en étant mal positionné dans l'EV. La pertinence des comportements et des représentations de l'agent est également un élément qui nous a amenés à mettre de côté pour l'instant les PVA. En effet, comme le souligne (Ryu et Baylor, 2005), l'agent doit être *crédible*, et la mise en place technique de comportements crédibles est un processus long qui doit potentiellement changer en fonction de la situation pédagogique. Un agent dans un magasin virtuel ne doit pas se comporter de la même manière qu'un agent sur une ligne de production ou sur un chantier, notamment vis-à-vis des notions de sécurité à respecter. Il faut également garder à l'esprit que les apprenants de notre cas d'étude sont jeunes (entre 15 et 18 ans), et par conséquent ils peuvent être amusés par certaines situations relatives à l'état de l'agent ou encore de la représentation graphique de l'assistant. Nos expériences passées avec les apprenants et l'emploi de simples personnages virtuels nous ont indiqué qu'il faut être prudent avec l'emploi d'agent dans une activité pédagogique, car certains comportements envers l'agent peuvent être source de perte de temps. Cela peut également être des remarques à propos de la représentation physique de l'avatar ou encore de son comportement.



FIGURE 3.10 – Avatar de l'utilisateur présent dans une zone à risques dans un scénario d'habilitation électrique. Il n'est pas possible pour un agent incarné d'être présent dans la même zone. Pour avoir de l'assistance, l'apprenant doit donc descendre de la gazelle et naviguer vers l'agent pédagogique qui est à l'extérieur de la zone de travail.

3.5 Processus de création d'EV pédagogique

Nous avons évoqué dans le chapitre précédent l'importance de l'écriture du scénario pédagogique. La seconde étape consiste en l'implémentation informatique de ce scénario pédagogique. Nous allons voir dans cette section les fondements nécessaires pour pouvoir initier une conception informatique d'un scénario pédagogique.

3.5.1 Approche générale

Dans ces travaux de recherche, nous employons le terme de « *conception pédagogique* » ou encore de « *conception d'une activité pédagogique* » pour évoquer l'écriture du scénario virtuel avec les enseignants. Il s'agit de l'étape où les différentes étapes de l'activité sont formalisées. Nous faisons référence à la création informatique du scénario sous le terme « *d'implémentation* » ou de « *conception informatique* ». Dans la littérature, des travaux ont été menés à propos du processus de conception informa-

tique d'un environnement pédagogique, notamment grâce à la création d'outils auteurs aidant les enseignants à concevoir eux-mêmes des activités pédagogiques à l'aide du numérique. Par exemple Marfisi-Schottman (2012) propose un outil de scénarisation de *Learning Games* (LG), LEGADEE¹⁰. Cette plateforme web permet à différents membres d'une équipe de conception d'organiser et de planifier les différentes étapes de conception d'un LG. D'autres approches mettent en avant des éditeurs de scénarios pédagogiques pour des environnements virtuels, limitant ainsi les besoins de programmation complexe (Oubahssi *et al.*, 2018), ou encore *VTS Editor*¹¹ qui permet de créer et déployer ses propres SG. C'est une approche intéressante dans le sens où l'enseignant peut, en autonomie concevoir son propre scénario virtuel. L'enseignant concepteur peut également utiliser des métamodèles pour guider la conception informatique, comme le métamodèle MASCARET (Buche *et al.*, 2004), utilisée dans le projet EAST (Taoum *et al.*, 2015) ou la suite HUMANS (Lourdeaux *et al.*, 2017; Lanquepin *et al.*, 2013). En revanche, l'utilisation de métamodèles demande des compétences précises, qu'il convient de maîtriser afin de pouvoir manipuler efficacement ces approches.

Pour une utilisation dans le cadre de la formation professionnelle, le processus intégral de création (conception pédagogique et implémentation) d'un scénario pédagogique est singulier par rapport aux autres approches. En effet la situation ainsi créée fait intervenir les notions de didactique professionnelle ainsi que d'approche par compétences. Cela implique une évolution des pratiques informatiques et d'écriture du scénario pédagogique. De plus, les activités s'effectuent sur des temporalités courtes (10-20 minutes), cela peut donc inclure l'utilisation de raccourcis tant sur le plan scénaristique que sur le plan interactif. C'est pourquoi nous allons prendre dans les prochains chapitres une voie différente des outils auteurs en mettant l'enseignant au cœur de la conception, mais où ce dernier n'intervient pas sur le plan technique de l'implémentation, de manière à optimiser l'implémentation du monde virtuel. Comme le rappellent Marfisi-Schottman *et al.* (2009) la création d'un SG est un processus long et couteux, et par conséquent il faut améliorer l'intégralité du processus de conception, surtout si la dimension industrielle constitue la finalité, comme dans notre projet de recherche. D'un point de vue informatique, un EV est constitué d'éléments spécifiques qui peuvent être regroupés en plusieurs catégories :

10. <https://projet.liris.cnrs.fr/legadee/>

11. <https://seriousfactory.com/logiciel-auteur-vts-editor/>

- **La modélisation 3D** : Correspond à la création des contenus visuels, modélisés en 3D. Il s'agit de la partie « visible » de l'EV, regroupant modèles 3D, effets visuels, animations et tout autre élément graphique nécessaire à la mise en place de la situation virtuelle. Le métier souvent associé à cela est l'infographie.

- **La programmation des comportements** : Pour pouvoir créer l'EV, il faut programmer les comportements. La modélisation est du fait de sa nature figée, sauf dans le cas d'animation où des effets préenregistrés peuvent être appliqués pour générer du mouvement. La programmation permet de créer des comportements dans l'EV, comme l'ouverture d'une porte, la gestion de la navigation ou encore le simple fait de jouer un son à un emplacement précis de l'environnement. Contrairement à la modélisation, les effets de la programmation sont plus indirects dans le sens où une approche de programmation changera le comportement d'un objet et non sa représentation graphique.

- **La pertinence pédagogique** : Cet élément correspond à la validation des interactions et des approches utilisées dans le scénario pour pouvoir permettre une bonne utilisation pédagogique tant par l'élève que par l'enseignant. Dans la majorité des développements, l'infographiste et le développeur (que nous généralisons en employant le terme « concepteur ») ne connaissent pas les métiers ciblés, il faut donc qu'ils soient conseillés. C'est donc le rôle de l'enseignant, qui apporte ses demandes, son point de vue vis-à-vis de son expérience et également des pratiques dans le monde professionnel du métier simulé virtuellement. Il faut donc mettre en place un dialogue entre les concepteurs et les pédagogues afin de s'assurer que l'EV convienne à une utilisation pédagogique. Finalement, dans notre cas d'étude, la pertinence pédagogique est au cœur de la conception et de l'implémentation d'activités virtuelles, car si cette partie est négligée, alors l'application finale sera difficilement utilisable sur le terrain, dans les établissements.

Ces deux principaux métiers doivent évoluer de concert pour pouvoir mettre en place des situations virtuelles pertinentes. Les contraintes sont pour l'infographiste de créer un thème visuel qui soit cohérent vis-à-vis du scénario pédagogique. Pour le

développeur, les contraintes sont multiples, cela peut porter sur le choix des interactions, la gestion des traces de l'apprenant, ou encore le choix d'adopter une approche générique pour le développement. Les choix d'implémentation peuvent directement impacter l'expérience utilisateur (*User Experience (UX)*), comme les performances du système qui peuvent avoir un impact sur les cybermalaises (Taupiac, 2018; Żukowska *et al.*, 2019) ou encore pour l'infographiste le choix du style visuel (Llanos et Jørgensen, 2011).

3.5.2 Diégétique

Un environnement virtuel vise à créer numériquement une situation qui peut être réaliste ou non. En revanche, pour être pertinent, le monde virtuel doit être cohérent. Les problèmes de cohérence temporelle ou visuelles peuvent nuire à l'expérience utilisateur. Le concepteur a donc tout intérêt de respecter ces règles de cohérence, de manière à favoriser l'impact immersif sur l'utilisateur. Cette fidélité logique du monde virtuel est d'autant plus importante lorsque l'on souhaite utiliser la RV à des fins de formation professionnelle. Par exemple choisir d'utiliser des équipements industriels futuristes ou non adaptés peut être problématique pour l'apprenant qui aura du mal à se projeter dans une utilisation des outils. Par ailleurs, une réduction des incohérences favorise l'autonomie de l'élève, car il peut aisément comprendre les comportements et les visuels, car ils sont proches du réel et cohérents (Çamcı, 2019). Cette cohérence est appelée diégétique. C'est-à-dire que les éléments s'inscrivent dans la narration du monde virtuel, alors que les éléments non diégétiques peuvent être considérés comme étant des éléments qui n'ont pas de lien direct avec la narration. La notion de diégétique est régulièrement utilisée dans la littérature pour évoquer les interfaces graphiques présentes dans le monde virtuel (Peacocke *et al.*, 2016; Fagerholt et Lorentzon, 2009; Iacovides *et al.*, 2015). Ce terme, initialement réservé au monde littéraire et cinématographique, a été transposé aux jeux vidéo par Galloway (2006).

En RV, nous pouvons diviser la diégèse en deux catégories principales, la **diégèse visuelle** et la **diégèse auditive**. Les jeux de science-fiction sont des contextes qui illustrent bien le concept de la diégétique (Figure 3.11a et Figure 3.11b), car les avancées technologiques dans l'histoire du jeu peuvent justifier certains choix d'interfaces,

d'objets ou d'ambiance sonore.



(a) L'interface diégétique du PipBoy dans le jeu Fallout4.



(b) Indicateur de santé dans le jeu *Dead-Space*, présenté dans (Peacocke *et al.*, 2016).

FIGURE 3.11 – Exemple de deux interface diégétiques.

Après une telle définition de la diégèse et des interfaces, il est tout naturel de se demander quel type d'interface choisir : diégétique ou non diégétique. Il n'y a pas de réponse universelle à cela, le style des interfaces est lié au contexte d'utilisation. C'est pourquoi ce champ d'études est important pour avoir de plus amples informations sur la création de situations immersives pertinentes, surtout pour la formation professionnelle où l'on souhaite afficher des méta-informations pour aider l'apprenant. Peacocke *et al.* (2016) ont choisi d'étudier l'efficacité des affichages tête haute dans les jeux vidéo récents. Les auteurs se sont focalisés sur l'affichage de la réserve de munitions du joueur en comparant différentes interfaces comme l'utilisation d'icônes de douilles, d'affichage numérique du style « 5/8 » ou encore l'utilisation barre indiquant les munitions restantes. Dans le contexte d'un jeu de tir, les douilles sont considérées comme étant diégétiques, car cela correspond au type de munition employé par l'arme du joueur. Cependant, utiliser une représentation de douilles à poudre alors que le joueur utilise un lance-pierre ou une tout autre arme peut questionner sur le qualificatif à employer pour cette interface. Les résultats de l'étude suggèrent que les interfaces diégétiques en jeu induisent une meilleure performance, mais les auteurs nuancent les résultats en indiquant que la performance d'une interface diégétique dépend fortement de la lisibilité de cette dernière. Notamment en fonction de la charge cognitive nécessaire à la lecture de l'UI. Dans ce contexte de jeu de tir, une quantité numérique est peut-être plus lisible qu'une représentation du magazine de l'arme, qui demanderait

peut-être plus de concentration pour un novice.

Raffaele *et al.* (2017) ont étudié le lien entre l'immersion et les interfaces virtuelles en utilisant la RV. Pour cela ils utilisent la terminologie des interfaces définies par Fagerholt et Lorentzon (2009) (Figure 3.12). Vingt jeux à la première personne ont été sélectionnés, classifiés selon la théorie de la diégétique, puis soumis à des étudiants qui ont dû répondre à des questionnaires. Les auteurs indiquent que les utilisateurs sont capables de percevoir l'interface ainsi que les *feedbacks* de cette dernière sans en avoir réellement conscience. La prise d'informations est naturelle et inconsciente, car les interfaces diégétiques s'inscrivent parfaitement dans la narration, ce ne sont pas des éléments hors contexte qui peut poser des problèmes. D'autres études similaires ont été conduites et les auteurs, notamment Salomoni *et al.* (2017), comparent des interfaces graphiques en fonction de leur inscription dans la théorie de la diégèse. Encore une fois, les participants ont préféré les implémentations diégétiques à celles qui ne le sont pas.

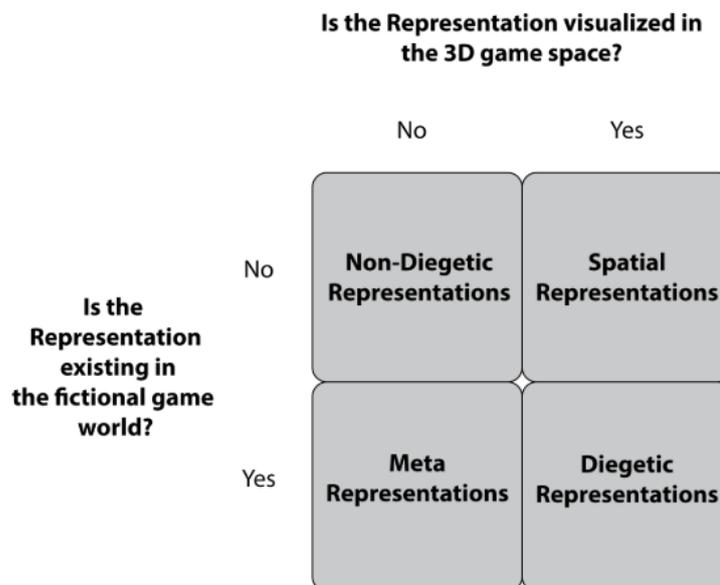


FIGURE 3.12 – Metamodèle de classification décrit par Fagerholt et Lorentzon (2009).

L'utilisation d'éléments diégétiques peut être pertinente dans un contexte de formation professionnelle. En effet, si la charge mentale liée à l'utilisation d'une interface est

faible, alors cela peut bénéficier à l'utilisateur sur la partie pédagogique de la tâche, le raisonnement est le même que pour l'article de Gallagher *et al.* (2005) cité dans le chapitre précédent, où l'optimisation de la charge mentale va directement influencer l'impact pédagogique de l'outil. Les interfaces sont plus faciles à manipuler lorsqu'elles suivent un design minimaliste et lorsqu'elles ne sont pas trop complexes (Llanos et Jørgensen, 2011). Dans l'étude de Llanos et Jørgensen (2011), les auteurs concluent que les utilisateurs veulent avoir accès uniquement aux éléments dont ils ont besoin, tout ce qui est superflu va donc nuire à l'immersion et à l'UX. Il convient donc de proposer des interfaces virtuelles qui soient simples à utiliser, concises et qui affichent uniquement les informations nécessaires.

Cependant, dans un contexte de formation professionnelle, les apprenants peuvent être amenés à avoir accès à une grande quantité d'informations pour mieux comprendre le contexte de l'activité, comme des consignes ou alors pour pouvoir faire l'activité convenablement, par exemple en utilisant des documents pour préparer une intervention sur un chantier. La présence de beaucoup de texte soulève certains problèmes. Tout d'abord, la qualité de certains *HMD* peut rendre la lecture difficile, ensuite, la présence de trop de texte peut empêcher l'utilisation d'une interface diégétique comme une montre connectée (Salomoni *et al.*, 2017). Il y a donc toute une réflexion à adopter vis-à-vis de la conception d'interfaces utilisateurs.

3.6 Utilisabilité, Expérience Utilisateur et Performance

3.6.1 Définitions

L'utilisabilité est un terme utilisé dans le domaine des interactions homme-machine. Il s'agit de la capacité d'un système à être utilisé aisément et efficacement par un humain. L'utilisabilité fait également référence à la facilité d'utilisation d'un produit (Bevan, 2008), notamment dans les approches d'analyse qualitative d'un produit auprès d'un consommateur. L'utilisabilité est une donnée mesurable dans une certaine mesure, grâce à des questionnaires tels que le *SUS* (*System Usability Scale* (Brooke et Weerdmeester, 1996)) ou encore le questionnaire *ASQ* (*After Scenario Questionnaire*, (Lewis, 1995)). D'autres méthodes d'évaluation de l'utilisabilité reposent sur l'utilisa-

tion d'heuristiques permettant de caractériser l'utilisabilité d'un jeu vidéo (Pinelle *et al.*, 2008). L'emploi d'heuristiques est intéressant, car cela permet de cerner plus efficacement l'origine de certains problèmes comme les contrôles, les mouvements de caméra mal adaptés, ou encore un manque d'aide à l'utilisation d'un jeu vidéo.

Pour la formation professionnelle, l'utilisation d'heuristiques est préférable aux questionnaires normalisés, car pour ces derniers, les apprenants peuvent avoir du mal à comprendre certains termes présents dans les questionnaires, de même que certaines tournures de phrases, menant à une mauvaise compréhension des questions.

L'expérience utilisateur (*User Experience, UX*) caractérise communément la relation entre un utilisateur et un produit spécifique dans un contexte de conception centrée utilisateur. Le terme *expérience utilisateur* est nouvellement employé pour évoquer le concept d'**ergonomie**. Il s'agit d'une notion qui est régulièrement présente dans l'innovation et dans la démarche qualité lorsque l'on conçoit ou analyse un nouveau produit. Comme l'indique (Hassenzahl, 2008), l'expérience utilisateur est souvent interprétée comme l'utilisabilité et la conception centrée utilisateur. L'auteur propose dans son article une définition personnelle de l'UX reposant sur l'état des sentiments de l'utilisateur vis-à-vis du produit qu'il est en train d'utiliser. La satisfaction résultante d'une utilisation du produit est également un moyen de qualifier l'expérience utilisateur (Bevan, 2008). L'UX consiste donc à faire accomplir à l'utilisateur plusieurs objectifs, qualifiés de pragmatiques et hédoniques par Bevan (2008). Par exemple, un objectif hédonique décrit dans Bevan (2008) peut être les réactions émotionnelles éprouvées par l'utilisateur au moment de l'utilisation du produit. En RV, l'UX va plus loin en incluant l'analyse des données objectives enregistrées par l'application virtuelle, des données subjectives comme des questionnaires et également l'observation de l'utilisateur pendant les tâches virtuelles.

La notion d'utilisabilité est parfois confondue avec l'expérience utilisateur. Nous choisissons dans ces travaux de thèse de bien distinguer les deux notions. Dans le sens où l'utilisabilité s'apparente dans notre cas d'étude aux éléments propres à la prise en main des contrôleurs, la facilité d'utilisation de ces derniers, de même que la prise en main des différentes interactions virtuelles permettant à l'utilisateur d'agir sur le monde virtuel. Alors que l'expérience utilisateur dans notre cas d'étude s'appa-

rente plus aux ressentis de l'apprenant, c'est-à-dire ses sentiments vis-à-vis du monde virtuel ou des interactions virtuelles. Notamment grâce aux retours visuels et haptiques de même qu'au processus d'étayage permettant de faciliter l'usage des outils virtuels tout en garantissant une forte dimension pédagogique. Nous choisissons donc de considérer une bonne expérience utilisateur comme étant une des conséquences d'une bonne utilisabilité du système. Bien que différentes, ces notions restent liées.

3.6.2 Application aux interfaces utilisateur

Dans le cas d'une interface graphique, le choix du style visuel et du design de l'interface influence la relation entre l'utilisateur et l'interface. Une interface qui comporte trop d'éléments interactifs peut nuire à l'expérience utilisateur, car l'utilisateur non expérimenté peut se perdre dans les rôles de chaque composant visuel. La tendance est donc aux approches conceptuelles minimalistes. Le principe est de réduire au maximum le nombre d'éléments interactifs de manière à fluidifier l'utilisation de l'application. Le résultat paraît donc aéré pour l'utilisateur ainsi que simple d'utilisation, car la clarté de lecture est privilégiée au réalisme visuel. L'expérience utilisateur est aussi directement liée à la réactivité de l'interface ainsi qu'à la présence de *feedback* visuel et audio. Par exemple, le manque de réactivité et de retours visuels peut faire que l'utilisateur ne sait pas si un clic a vraiment fonctionné. Forçant ainsi à cliquer plusieurs fois sans voir de changement à l'écran, et en fonction des profils d'utilisateurs, de l'agacement peut apparaître, nuisant fortement à l'UX.

En plus de l'approche minimaliste, le style visuel contribue également à garantir une bonne utilisabilité et une bonne expérience utilisateur. Le style *flat-design*, correspond à une approche visuelle adoptant des représentations simplifiées des fonctions sans ajout de reliefs sur les icônes. L'approche se veut très épurée et sans détails superflus. L'objectif du *flat-design* est d'améliorer le temps d'apprentissage de l'interface et est également un effet de mode. Les effets de mode sont à considérer lorsque l'on conçoit des situations pédagogiques virtuelles, car le public ciblé, les apprenants, sont familier des approches *flat-design* présentes sur les réseaux sociaux ou les autres logiciels (Burmistrov *et al.*, 2015). De ce fait, il peut être préférable d'adopter des codes communs pour favoriser l'utilisabilité et l'UX des apprenants.

En opposition au *flat-design*, nous avons l'approche skeuomorphe. C'est-à-dire qu'une interface utilise des représentations réalistes pour les éléments visuels, afin de correspondre plus fidèlement aux composants réels représentés sur l'interface. Par exemple, le fait de simuler un réel potentiomètre pour changer le volume d'une application est une approche skeuomorphe (Figure 3.13a). La notion de réalisme est souvent confondue avec l'approche skeuomorphe (Page, 2014). En effet, l'utilisation d'un visuel « ancien » ou « kitsch » ne suffit pas pour qualifier une interface de skeuomorphe, il faut que le comportement de l'objet simulé corresponde au comportement réel (Page, 2014).



(a) L'interface skeuomorphe du logiciel AmpliTube sur iOS.



(b) Interfaces utilisées dans l'expérimentation de Backhaus *et al.* (2018), à gauche : flat, à droite : skeuomorphe.

FIGURE 3.13 – Styles graphiques d'interfaces.

Pour Burmistrov *et al.* (2015) le *flat-design* est majoritairement critiqué pour son manque d'éléments stimulant le cerveau en raison de l'approche *plate* des représentations visuelles, ne stimulant pas convenablement la partie du cerveau qui s'occupe de la perception 3D. Les auteurs continuent en évoquant le fait que le minimalisme du *flat-design* peut laisser paraître aux utilisateurs que certains éléments graphiques ne sont pas interactifs alors qu'en réalité ils le sont (Burmistrov *et al.*, 2015). Causant ainsi un nombre conséquent d'erreurs de clics sur l'interface et de déclenchement de fonctions non voulues.

Le profil de l'utilisateur est à prendre en compte dans le choix de certaines approches graphique, tel que le style visuel des interfaces. Comme le souligne l'étude de Cho *et al.* (2015) les personnes âgées préfèrent l'approche réaliste, notamment parce que les participants semblent mieux accepter les visuels proches de la réalité que les éléments plus abstraits (*flat*). Backhaus *et al.* (2018) se sont également intéressés à la différence de préférences et d'expérience utilisateur entre le *flat-design* et l'approche skeuomorphe en fonction de l'âge. Ils ont donc mené des expérimentations avec deux groupes de participants. Le premier groupe est constitué de *Digital Natives* (Prensky, 2001) âgés de dix-huit ans et l'autre groupe, des personnes plus âgées, les *Digital immigrants* (Prensky, 2001). Les participants doivent utiliser les différentes applications d'un *smartphone* avec deux variantes visuelles de l'interface du *smartphone* (Figure 3.13b). Les résultats montrent que le public jeune tend à préférer l'approche *flat-design* alors que le groupe de test plus âgé préfère l'approche skeuomorphe. L'âge en lui-même n'est pas une influence de choix, cependant pour les auteurs, une population d'une même génération tend à partager les mêmes affinités, connaissances, habitudes et goûts. Par exemple la jeune génération n'est pas forcément familière avec des icônes skeuomorphes issues d'objets analogiques, alors que la génération plus ancienne connaît bien ces objets, ce qui explique le choix des préférences.

Ces préférences en termes d'esthétisme et de style graphique sont aussi à prendre en compte en RV. La littérature souligne l'importance de choisir un style graphique approprié à la population ciblée par l'application. Adopter une approche qui diminue le temps d'adaptation est préférable pour une exploitation pédagogique, car cela permet de mieux distribuer les ressources cognitives disponibles et de focaliser l'apprenant sur la situation pédagogique plutôt que sur les détails visuels.

3.6.3 Évaluation de la performance

La conception d'un EV ou d'une technique d'interaction va de pair avec la notion d'évaluation. En effet, il existe maintenant de multiples façons de mettre en place un EV ou une interaction, ce qui implique de procéder à des évaluations plus poussées afin de déterminer quelles sont les bonnes approches pour le contexte choisi. Richard (2011) détaille plusieurs approches d'évaluation synthétisées dans la figure 3.14. Parmi ces

méthodes nous retenons l'évaluation formative qui consiste en une méthode empirique qui a pour but d'identifier des problèmes fonctionnels, ergonomiques, de prise en main ou de performance liée à la technique employée.

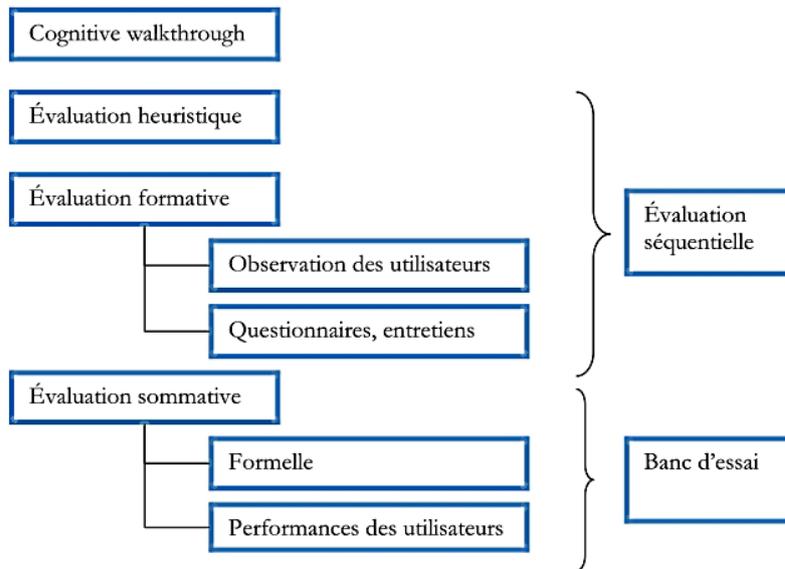


FIGURE 3.14 – Classification des méthodes d'évaluation synthétisées dans Richard (2011).

L'approche formative peut être informelle (résultats qualitatifs) ou formelle (résultats quantitatifs et qualitatifs), ce qui autorise plusieurs situations expérimentales à différentes étapes de la conception de l'EV ou de la technique. Dans notre cas d'étude, cette évaluation est intéressante, car cela nous permet de réaliser des prétests pendant la conception et également des situations expérimentales plus avancées dans le but d'évaluer une technique particulière. Pour des protocoles expérimentaux plus formels, nous avons l'évaluation sommative qui consiste à comparer plusieurs techniques d'interaction. Il s'agit pour notre cas d'étude d'une autre approche intéressante pour pouvoir comparer des situations virtuelles terminées, notamment car l'évaluation sommative permet la récupération de données autorisant ainsi des analyses statistiques des sessions expérimentales. Une autre approche décrite dans Richard (2011) est à propos des bancs de tests. Il s'agit d'une façon de tester indépendamment plusieurs techniques d'interactions pour fournir des résultats génériques. Cette approche

est également appelée informellement l'approche dite « bac à sable » où chaque composante à évaluer est isolée et indépendante des autres interactions.

Dans Richard (2011), plusieurs moyens de mesure sont décrits. Ces derniers permettent l'analyse des sessions d'évaluations / expérimentales. Il s'agit d'indicateurs, et ce terme rejoint également la terminologie utilisée dans l'EN pour qualifier les données utilisées pour évaluer les apprenants, notamment le terme « indicateur de performance » qui fait référence aux éléments permettant apprécier la réalisation d'un apprenant. Nous avons donc les indicateurs objectifs, qui sont des variables mesurées par l'application comme le temps passé à effectuer une tâche ou encore le nombre d'échecs pour une action donnée. Il y a ensuite les mesures subjectives qui peuvent correspondre aux questionnaires remplis par le sujet avant ou après une situation expérimentale. Ces mesures sont font régulièrement référence aux méthodes de récupération d'informations utilisées pour quantifier la sensation de présence, *flow* ou d'immersion.

D'autres techniques d'évaluation existent pour évaluer des interactions précises. Par exemple Muller (2019) détaille pour chaque technique de la taxonomie de Bowman (Bowman *et al.*, 2001) les évaluations associées. Par exemple, pour l'évaluation de la sélection, la loi de Fitts peut être envisagée. Il s'agit de mesurer la vitesse et la précision de sélection d'objets. Pour la navigation et la manipulation, Muller (2019) fait état d'indicateurs objectifs et subjectifs tels que la vitesse d'exécution, les notions temporelles ou encore la facilité d'utilisation de la technique.

3.7 Synthèse

La RV n'est plus uniquement le fait d'afficher des modèles dans un espace tridimensionnel et de prendre en main des objets, il s'agit maintenant d'ajouter plus de détails et d'options au sein de l'EV. En effet, avec la montée en puissance des moyens techniques, les concepteurs complexifient les situations virtuelles, parfois au détriment de la lisibilité, ce qui peut nuire à la qualité finale de l'application virtuelle. Le contrôle d'application identifié par Bowman *et al.* (2001) est de plus en plus présent dans les mondes virtuels, c'est pourquoi il convient de s'intéresser aux interfaces virtuelles ainsi qu'aux différentes méthodes d'interactions qu'il faut utiliser pour pouvoir agir sur l'EV.

Dans le cas d'une utilisation pédagogique, le choix des techniques d'interaction est crucial afin d'éviter que l'apprenant ne passe trop de temps à manipuler l'outil plutôt que d'effectuer les tâches pédagogiques. L'utilisabilité des interactions et l'expérience utilisateur qui en découle sont donc des facteurs importants à prendre en compte pour une utilisation avec des apprenants et des enseignants.

Pour qu'un EV soit pertinent pour l'utilisateur, ce dernier doit être un bon vecteur de présence, de même que comporter peu de charge mentale lors de l'utilisation des interactions 3D. Un bon EV doit également faire preuve d'une bonne utilisabilité, que ce soit vis-à-vis des contrôleurs ou de la lisibilité des informations présentes dans le monde virtuel. Enfin, pour qu'une situation virtuelle soit efficace, il faut réduire au maximum les cybermalaises, par exemple en adoptant une technique de navigation adaptée à l'EV. Il est primordial de considérer la cohérence de l'EV ainsi que de choisir des modalités d'interactions 3D qui conviennent au public. Avec l'explosion de la RV auprès du grand public, nous constatons l'apparition d'une multitude d'outils pédagogiques à destination de la formation professionnelle qui ne considèrent pas les éléments suivants :

1. **L'élève.**
2. **L'enseignant.**
3. **La complexité de l'apprentissage.**
4. **Les modalités d'interactions.**

Dans une approche centrée sur la formation professionnelle, il est préférable de prendre en compte l'ensemble de ces éléments, de manière à créer des situations pédagogiques pertinentes pour les apprenants et les enseignants. Chaque filière possède ses spécificités, que ce soit dans les pratiques pédagogiques que dans le public concerné. Le point de départ à la conception d'une application pour la formation professionnelle doit donc être le contexte pédagogique et non les moyens techniques. Nous allons donc dans les prochains chapitres proposer différentes approches permettant de créer des situations d'apprentissages qui soient pertinentes pour les enseignants et les apprenants des filières professionnelles.

DEUXIÈME PARTIE

Contributions

APPROCHE GÉNÉRIQUE POUR LA CONCEPTION D'EV POUR LA FORMATION

Nous avons vu dans les deux chapitres précédents, différentes approches utilisées dans formation professionnelle ainsi que les différents outils et interactions 3D permettant d'agir au sein de la RV. Ces éléments vont nous être utiles pour la conception, l'implémentation et l'évaluation d'EV pour la formation professionnelle. Comme nous l'avons vu, les systèmes RV intègrent différentes techniques d'interaction 3D fondamentales (sélection, manipulation, navigation, contrôle d'application), qui ont été classifiées sous la forme de taxonomies, notamment par Bowman *et al.* (2001) ainsi que l'emploi de guides virtuels pour assister un utilisateur dans la réalisation d'actions dans un contexte numérique Otmane (2000).

À partir de ces interactions génériques, nous proposons un ensemble d'outils et de fonctionnalités plus particulièrement orientées vers la formation professionnelle. Nous commençons par la description générale d'un modèle que nous proposons pour organiser les différentes fonctionnalités informatiques présentes dans le monde virtuel pour une application à la formation professionnelle. Le but de notre approche est d'optimiser le processus d'implémentation, afin qu'il soit pertinent et applicable en conditions réelles. En effet, il est judicieux que les interactions soient facilement utilisables et compréhensibles par les apprenants et que le scénario pédagogique soit cohérent avec les matières enseignées. Nous proposons également dans ce chapitre la mise en place d'un processus de simplification des interactions, que nous nommons l'étayage. Son objectif est de simplifier des actions à faire dans l'EV lorsque celles-ci n'apportent pas une plus-value dans l'apprentissage visé.

4.1 Proposition d'un modèle générique

Pour concevoir des EV de formation, nous proposons plusieurs fonctions et méthodes essentielles pour allier didactique professionnelle et RV. Chaque fonctionnalité est pensée pour former une brique logicielle générique. Par exemple, la gestion de la navigation au sein d'un EV constitue une brique logicielle fondamentale qui permet à l'utilisateur de se déplacer. Avant d'aller plus loin dans nos contributions, nous précisons les rôles des différents acteurs impliqués dans notre approche de conception d'EV pédagogique :

- Le **concepteur** : Ce rôle fait référence aux développeurs et infographistes qui vont contribuer à la création du monde virtuel et l'implémentation des différentes interactions. Il s'agit ici d'un rôle technique endossé par une ou plusieurs personnes. Le concepteur est également impliqué dans le processus de conception des activités pédagogiques, comme nous l'expliquons dans le chapitre 5.
- L'**enseignant** : Il s'agit de l'ensemble des référents pédagogiques qui vont utiliser l'outil pédagogique, de même que participer à la conception des activités virtuelles pédagogiques. Ce rôle pédagogique peut faire référence aux enseignants des lycées, mais également aux inspecteurs académiques, Directeur Délégué aux Formations Professionnelles et Technologiques en établissement (DDFPT) ou encore aux formateurs de centres de formations spécifiques. Nous précisons aussi que dans notre approche, l'enseignant ne peut pas avoir le rôle de concepteur d'un point de vue informatique, mais uniquement une intervention sur la conception pédagogique des activités.
- L'**apprenant** : Il s'agit de la cible finale de la simulation pédagogique. Nous pouvons également utiliser le terme élève, mais en situation de formation professionnelle, le terme apprenant est préféré. Dans notre cas d'étude, ce rôle fait référence aux jeunes en formation continue dans les lycées professionnels, généralement âgés de 15 à 18 ans.

Dans un contexte de RV, l'approche générique s'impose comme une évidence, surtout lorsque l'on vise l'industrialisation du processus de conception (Buche *et al.*, 2004;

Lanquepin *et al.*, 2013). En effet, il existe, plusieurs approches pour simuler un comportement dans un EV.

Par exemple, un enseignant souhaite mettre en place une situation de maintenance de système frigorigène, mais si le concepteur ne connaît pas le métier, la seule approche qu'il peut choisir pour l'implémentation, c'est de répliquer fidèlement d'activité professionnelle. À savoir l'utilisation d'une physique simulée avec des comportements de tuyaux réalistes, de manière à rester le plus proche de la tâche réelle ; et inversement, un autre concepteur plus au fait du métier simulé peut simplifier certaines actions qu'il sait peu pertinentes comme l'utilisation d'animations au lieu d'une physique réaliste. Nous pouvons citer un autre exemple, à savoir le placement d'étiquettes de prix lors d'une activité de mise en rayon. Deux approches principales sont possibles, soit le concepteur choisit d'indiquer précisément les prix, avec des étiquettes très réalistes et du texte clairement lisible, soit il se contente d'un modèle 3D générique avec du texte illisible. Ce dernier exemple permet de souligner deux éléments importants dans notre démarche. Tout d'abord, avec l'approche réaliste, l'utilisateur en immersion n'arrivera pas à lire convenablement le prix et la référence du produit. Il y a donc une perte de temps significative passée à déchiffrer les informations. Ensuite, la question suivante peut également se poser : « *Est-ce réellement intéressant d'un point de vue pédagogique, d'afficher toutes ces informations ?* ». En effet, cela peut être travaillé en réel, or dans cette activité virtuelle, nous cherchons à ce que la procédure de mise en rayon soit travaillée, à savoir, placer l'étiquette et non la lecture de cette dernière. Notre approche de la RV pour la formation repose sur l'implémentation de procédures pédagogiques pertinentes. Nous ne souhaitons pas que l'apprenant effectue une gestuelle précise superflue ou des actions copiées de la réalité, car dans ce cas, la RV n'a guère d'intérêt pédagogique. Les actions au sein du monde virtuel doivent être pertinentes pour l'apprentissage visé, c'est pourquoi certaines actions doivent être simplifiées ou enlevées de la procédure, car elles n'apportent pas une plus-value significative à la situation virtuelle. Nous voyons au travers de ces exemples que la finalité d'un Environnement Virtuel pour l'Apprentissage Humain (EVAH) se trouve drastiquement différente suivant le degré de réalisme choisi.

Il semble donc approprié de proposer un ensemble d'interactions normalisées, qui correspondent aux attentes pédagogiques des enseignants et qui permettent égale-

ment d'optimiser l'intégralité du processus de création de nouveaux contenus. Cependant, une approche générique implique de nouvelles contraintes pour le concepteur, parmi les plus importantes nous pouvons citer :

- **Un temps de développement supplémentaire.** Le concepteur doit réfléchir à un maximum de cas possibles d'utilisation, de même que mettre en place des aides pour les autres concepteurs qui vont utiliser la brique logicielle. Ces étapes supplémentaires rajoutent du temps de réalisation, néanmoins, plus la brique est utilisée, plus ce temps est amorti.
- **Une complexité accrue.** Le concepteur doit prendre en compte un nombre plus élevé de cas d'utilisation possible. Il en est de même pour l'enseignant qui procède à l'écriture du scénario, où la prise en compte de plusieurs niveaux d'apprenants complexifie l'implémentation par le concepteur. Réfléchir à un maximum de possibilités d'usage représente à la fois une complexité mentale, mais également algorithmique, car une approche générique rajoute une grande quantité de lignes de code qu'il faut par la suite être capable de maintenir ou d'améliorer. La maintenance des briques est donc à effectuer par une personne à l'aise avec la programmation.

4.1.1 Évolution du matériel

En RV l'utilisation de l'approche générique est d'autant plus pertinente qu'il y a une très forte dynamique autour de l'évolution du matériel. En effet, au démarrage de ces travaux, le casque HTC Vive et l'Oculus Rift CV1 était sur le marché. Puis au cours de ces trois années de thèse, d'autres casques sont arrivés pour les remplacer. En soi, une nouvelle itération de casque n'est pas un problème si la qualité s'en trouve augmentée. En revanche, si les contrôleurs ou la technologie changent, cela peut devenir problématique pour les concepteurs d'environnements virtuels et fatalement, pour l'utilisateur final. Cela soulève plusieurs questions :

- Faut-il abandonner l'ancienne génération de dispositifs immersifs au profit de la nouvelle ?

- En plus de gérer la nouvelle génération de dispositifs immersifs, faut-il maintenir les anciennes versions ?
- Comment organiser la maintenance et la demande de développement pédagogique pour un établissement équipé d'un ancien dispositif immersif ?

Ces questions sont d'autant plus importantes lorsque les dispositifs d'entrée du système (contrôleurs) sont très différents d'un modèle à l'autre. Comparons trois systèmes : le CAVE, le HTC Vive et l'Oculus Rift CV1. Le premier utilise dans notre cas d'étude des manettes de *Playstation Move*. Les deux autres systèmes ont leur propre système de manettes (Figure 4.1a et Figure 4.1b). Par exemple, nous distinguons notamment la présence de quarts boutons sur le Rift CV1 (*a, b, x, y*) et d'un *pad* tactile pour le HTC VIVE. Compte tenu de ces différences, trois solutions sont envisageables :

- Choisir un équipement spécifique et l'exploiter à ses pleines capacités, limitant ainsi l'usage des autres équipements.
- Limiter l'usage des équipements et trouver des moyens d'interaction communs pour améliorer la compatibilité entre les systèmes.
- Créer une interaction générique qui réagit différemment en fonction du dispositif utilisé.



FIGURE 4.1 – Contrôleurs utilisés par différents casques de RV.

Nous avons choisi la seconde approche, car elle s'inscrit efficacement dans notre démarche de développement générique, de plus elle a été motivée par la finalité de la

formation professionnelle. Ce choix de ne pas favoriser un dispositif en particulier est intéressant pour une utilisation pédagogique, car cela garantit une consistance entre les systèmes et donc entre les lycées qui ont choisi différents dispositifs de RV. Pour que la technologie de la RV soit bien reçue par les enseignants, il convient de réduire au maximum le temps de maîtrise du système ainsi que le temps d'adaptation d'un système à un autre. Bien entendu, il y aura toujours un apprentissage du matériel en lui-même, à savoir la calibration et l'utilisation générale. En revanche, l'utilisation de la couche logicielle se doit d'être identique, quel que soit le système virtuel utilisé, car elle est déjà suffisamment complexe à prendre en main pour les enseignants. Il est donc selon nous judicieux de considérer les évolutions matérielles pour pouvoir passer du stade expérimental à une utilisation à plus grande échelle sur le terrain.

4.1.2 Processus de simplification d'une interaction

Mettre en place une situation de formation en numérisant une activité didactique est un processus complexe qui requiert un séquençage précis des actions à réaliser dans l'EV. Ces actions doivent également correspondre aux habiletés des apprenants qui vont utiliser l'application virtuelle. Pour le concepteur, il existe plusieurs façons de programmer une action dans le monde virtuel. Pour ce faire, il faut à un séquençement des interactions, de manière à mettre en valeur toutes les actions à réaliser par l'apprenant (Figure 4.2a). Ce séquençement est effectué pendant l'étape de conception du scénario pédagogique et les actions contenues sont très proches de celles effectuées dans la réalité par le professionnel ou l'apprenant sur le plateau technique.

Cette première approche donne une succession d'étapes qui correspondent fidèlement à la réalité. Par exemple, effectuer le geste pour dévisser les vis d'un carter, ou encore utiliser un gerbeur de la même manière que dans les centres de logistique pour prendre des palettes dans une réserve de magasin. L'approche réaliste ne pose aucun problème pour l'apprenant, car il s'agit des mêmes actions qu'en réel. Cependant une interaction qui mime la réalité peut être plus complexe à réaliser en contexte virtuel en raison d'une plus grande quantité d'étapes à réaliser, ou alors à cause de la précision à avoir avec les manettes. De plus, l'interaction s'effectue par le biais d'un moyen technique et non directement avec la main de l'utilisateur. Si le geste virtuel est mal capté

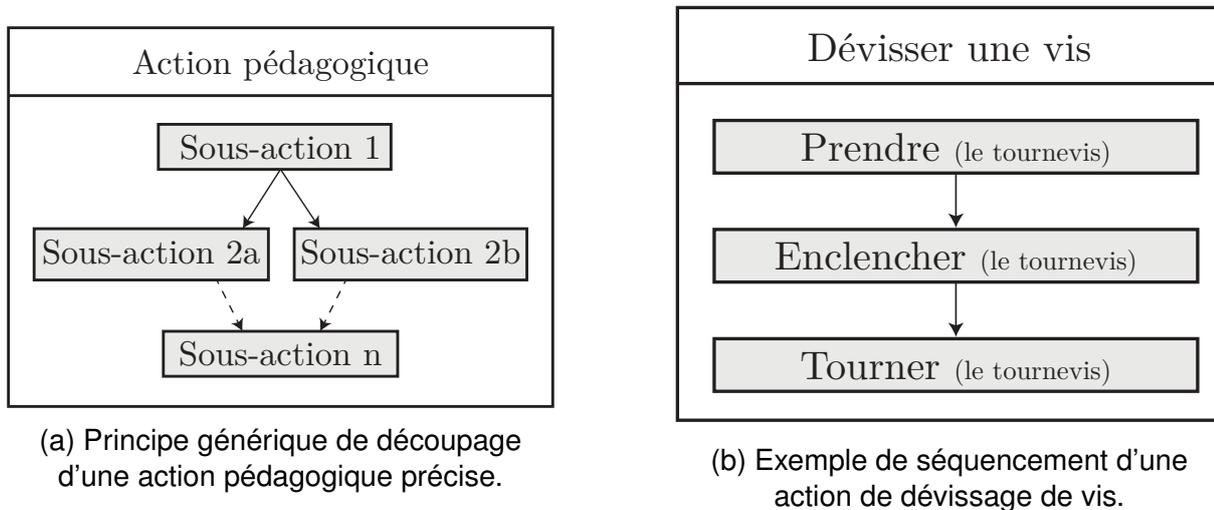


FIGURE 4.2 – Exemple volontairement simplifié de séquencement d'une action pédagogique dans le monde virtuel.

par le système, cela peut mener à des situations d'incompréhension pour l'apprenant, qui peut par la suite s'impliquer cognitivement plus fortement dans la réalisation du geste, occultant ainsi des éléments clefs du scénario pédagogique. Dans notre façon d'amener la RV pour la formation professionnelle, nous ne souhaitons pas proposer des situations pédagogiques qui répliquent fidèlement l'intégralité du réel, car dans de tels cas, cela remet en cause l'intérêt même de la RV.

À partir du séquençage réel des actions effectué par les enseignants lors de l'étape de conception du scénario pédagogique (chapitre 5), un processus de simplification est mis en place par le concepteur. Ce dernier est central dans notre approche de la RV appliquée à la formation professionnelle. L'essentiel des briques logicielles présentées dans ce chapitre et le suivant sont le fruit d'un processus d'étayage conséquent, visant à améliorer l'efficacité pédagogique des situations virtuelles en réduisant la complexité de certaines actions dans le monde virtuel. L'étayage d'une interaction consiste à simplifier cette dernière dans le but de la rendre plus rapide et plus facilement compréhensible par l'apprenant. Cette étape d'étayage doit être néanmoins gérée au cas par cas pour chaque interaction et contexte pédagogique. C'est pourquoi nous ne proposons pas ici d'outil auteur permettant de créer des séquençages simplifiés. Pour pouvoir mettre en place un tel processus, nous suggérons d'étudier chaque action en se posant par exemple les questions suivantes :

- Est-ce que l'interaction comporte de la gestuelle ?
- L'interaction est-elle nécessaire à la réalisation de l'activité pédagogique ?
- L'interaction est-elle nécessaire à l'apprentissage visé ?
- Quel est l'impact de cette interaction sur le scénario ?
- S'agit-il d'une interaction longue à réaliser ?
- L'interaction est-elle trop complexe pour les apprenants ?
- Un équivalent a-t-il déjà été développé ?
- L'interaction est-elle compatible avec tous les dispositifs utilisés ?

Ces questions visent à isoler les actions comportant une gestuelle précise, prenant trop de temps à réaliser ou encore une compréhension difficile pour l'élève. En reprenant l'exemple du dévissage de carter, nous pouvons voir que des améliorations peuvent être mises en place. La figure 4.3 indique les étapes qui peuvent être simplifiées. D'un point de vue purement conceptuel et informatique, l'étayage est une étape qui vient faciliter les développements informatiques, car après avoir simplifié une action, le résultat peut converger vers une action simplifiée déjà implémentée. De ce fait, le concepteur peut réutiliser les développements passés au lieu d'en effectuer des nouveaux.

L'étayage n'est pas généralisable dans tous les cas. En effet certaines interactions demandent de la gestuelle qui est propre à l'outil utilisé et qui constitue un élément important pour l'apprentissage visé. Par exemple, sur la figure 4.4, l'utilisateur doit vérifier le fonctionnement d'un Détecteur D'absence de Tension (DDT) en testant les pointes de touches. Ce geste, ne peut pas faire l'objet un étayage, car il est ici critique dans l'utilisation de l'outil. Dans ce cas précis, il faut essayer d'aider au maximum l'élève avec des guides virtuels (Otmane, 2000) tels que des aides visuelles ou du magné-

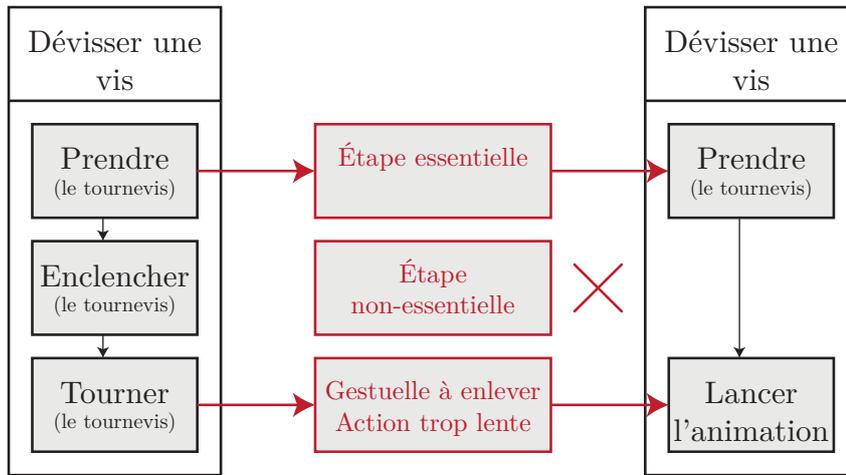


FIGURE 4.3 – Exemple simplifié d'un processus d'étagage sur une action virtuelle liée à un tournevis.

tisme entre les deux pointes de touche. L'étagage est donc une étape importante à gérer au cas par cas en fonction du contexte pédagogique et des interactions à inclure dans le monde virtuel.



FIGURE 4.4 – Illustration d'un outil spécifique, DDT, demandant une gestuelle obligatoire et nécessaire pour une activité de réparation de prise électrique.

4.1.3 Modélisation du monde virtuel pédagogique

Nous proposons dans notre approche de segmenter et classer les interactions et fonctionnalités présentes dans le monde virtuel afin de donner aux concepteurs et enseignants, une plus grande flexibilité pour utiliser les briques logicielles dans d'autres contextes. La complexité de concevoir et de tester une situation virtuelle pédagogique sur le terrain dans les lycées repose sur le fait que nous devons mettre en place un scénario pédagogique virtuel complet et approprié avant de pouvoir le tester en conditions réelles. Le modèle est représenté schématiquement dans la figure 4.5.

Les actions s'effectuent à partir des contrôleurs, et la perception s'effectue par le biais du système d'affichage ou des retours haptiques ou audio disponibles. Cela peut être un casque de RV, un CAVE ou tout autre système. Le modèle ne précise pas le type de système. Nous avons segmenté les fonctions en plusieurs sections :

- **Les modules d'interactions** : Il s'agit des actions de base, nécessaires à la réalisation des tâches les plus simples comme se déplacer ou interagir avec le monde virtuel.
- **Les modules d'accompagnement** : Il s'agit de l'ensemble des fonctionnalités permettant d'assister et de guider l'utilisateur dans la réalisation de l'activité pédagogique.
- **La scénarisation** : Cette partie s'occupe de gérer la mise en place du scénario pédagogique au sein du monde virtuel, ainsi que la gestion du paramétrage de la situation pédagogique.
- **Modules et méthodes d'exploitation pédagogique** : Cette section regroupe les éléments et méthodes permettant d'exploiter les traces issues de la session virtuelle. Ce module s'occupe de transformer les observables du monde virtuel par le système en éléments exploitables par les enseignants ou les apprenants. Permettant par la suite la conduite d'un entretien d'explicitation pour évaluer la performance de l'apprenant.

Dans un contexte de formation professionnelle, la partie la plus importante est le

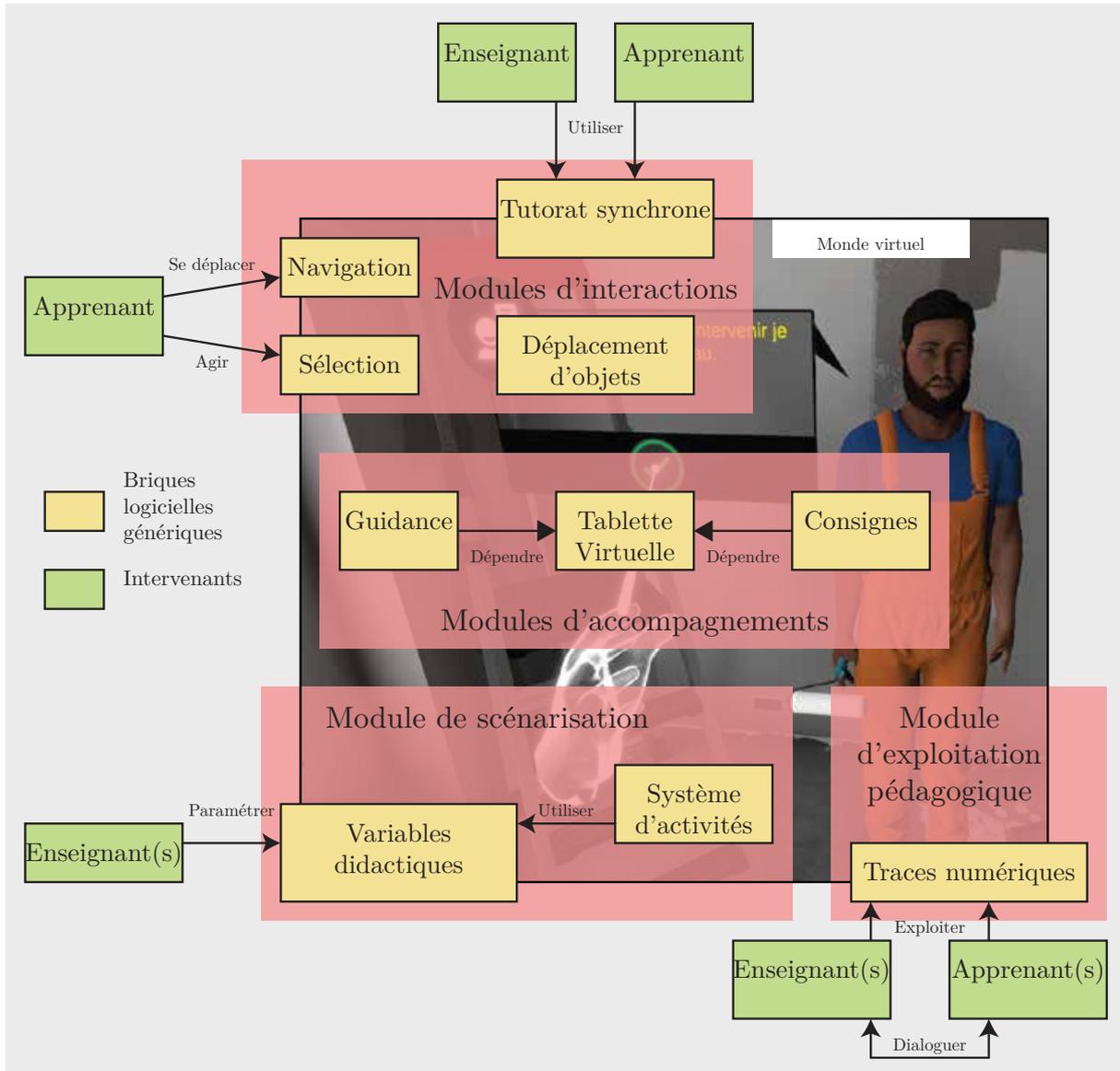


FIGURE 4.5 – Représentation schématique d'un EV pour la formation professionnelle.

module « *Scénarisation* », de même que le module « *Exploitation pédagogique* ». Notre approche consiste à assister et simplifier les actions, afin que l'apprenant se concentre sur les compétences à travailler et non sur la réalisation des actions dans l'EV. C'est pourquoi nous proposons un modèle découpé en modules ayant tous différents degrés d'implication sur la charge cognitive de l'apprenant. Par exemple, le module de sélection se doit d'être très simple à utiliser, de manière à devenir quasi instinctif. Il en est de même pour les modules d'accompagnement, qui doivent, en plus de procéder à un étayage important, être simples d'utilisation et rapidement compris par l'apprenant. De manière à focaliser au maximum l'attention de l'utilisateur sur les éléments du module de scénarisation.

4.2 Modélisation des interactions

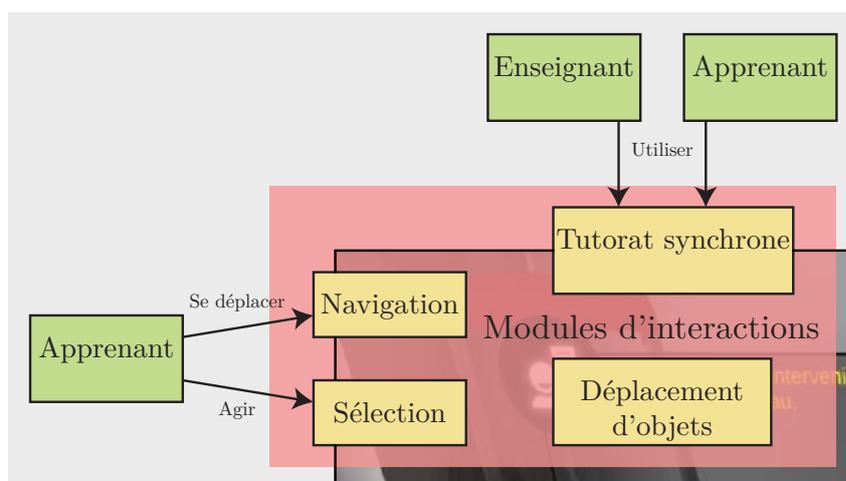


FIGURE 4.6 – Représentation des différents modules d'interaction au sein de la modélisation de l'EV proposée.

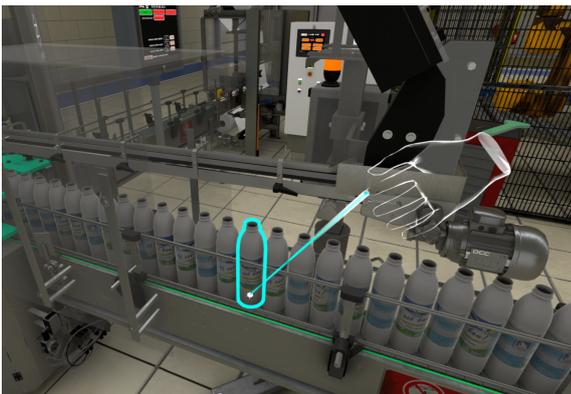
La première section du modèle de représentation du monde virtuel pédagogique contient les éléments suivants :

1. Navigation.
2. Sélection.

3. Déplacement d'objets.
4. Mode tutorat synchrone.

La particularité de ce module est aussi qu'il sert de point d'entrée au monde virtuel, notamment via les interactions de sélection et déplacement ainsi que le mode tutorat synchrone pour l'enseignant ou un autre apprenant accompagnateur. Ces interactions sont considérées comme des modalités dites de « bas niveau », c'est-à-dire qu'elles sont présentes dans toutes les situations virtuelles et par conséquent elles se doivent d'être faciles à utiliser et constantes.

4.2.1 Technique de sélection proposée



(a) Utilisateur pointant une bouteille à l'aide d'un *raycast*.



(b) Utilisateur pointant un élément non-interactif.

FIGURE 4.7 – Technique de sélection.

La sélection est une interaction décrite par Bowman *et al.* (2001). Nous précisons donc dans cette sous-section que pour la mise en place de ces travaux de recherche, nous avons utilisé la technique dite de *raycasting* (Bowman et Hodges, 1997), ou « lancer de rayon » en français. Ce choix a été motivé par la simplicité d'utilisation pour les élèves et les enseignants de cette technique. De plus cela nous permet également de mettre une certaine distance avec l'approche réaliste qui consiste à mimer la réalité. Pour sélectionner un objet, un utilisateur va donc pointer l'objet à l'aide d'un rayon mis en évidence dans le monde virtuel. Ce rayon possède une distance modulable,

forçant ainsi l'utilisateur à plus moins se rapprocher de l'élément interactif pour pouvoir agir dessus. Lorsqu'un *raycast* touche un objet sensible au rayon, alors nous pouvons accéder à diverses valeurs et propriétés (Tableau 4.1). Nous faisons référence à l'ensemble des propriétés du résultat d'un *raycast* sous la dénomination R , que nous utilisons à plusieurs reprises dans ce manuscrit pour décrire certains comportements et algorithmes.

Intitulé	Type
Point d'impact P	Coordonnée 3D
Normale à l'impact N	Direction 3D
Distance de l'origine du rayon D_{ray}	Coordonnée 3D

TABLEAU 4.1 – Données utilisés lors des *raycasts*, noté R .

La sélection ne se limite pas à juste « pointer » un objet, l'utilisateur doit pouvoir effectuer des interactions. C'est pour ce genre d'interaction que l'approche générique vis-à-vis du matériel intervient. En effet, en raison de la multitude de systèmes disponibles, il est judicieux de limiter la quantité de boutons à utiliser lors de la sélection. Nous avons donc mis en place un module de sélection générique qui n'utilise que deux inputs :

- **La touche action.** Cette touche permet de faire une action comme ouvrir une porte, prendre un objet, etc. Il s'agit de l'input universel avec lequel toutes les actions s'effectuent.
- **La touche de relâchement** (*release*). Elle permet à l'utilisateur de relâcher ou d'annuler une action. Nous discutons néanmoins cet input à la fin de ce chapitre.

La sélection est un concept simple, il constitue la base d'un EV et il ne faut pas négliger son implémentation. Dans une approche pédagogique, il faut faire en sorte que ce processus soit simple à comprendre et à utiliser pour l'apprenant. Sans quoi, cela peut impacter négativement l'utilisation même de la RV. Tout d'abord, en plus de la réduction des inputs à utiliser, il est nécessaire de mettre en place des retours visuels indiquant l'état de l'interaction (Figure 4.7). En effet, sans indications, l'utilisateur ne peut pas savoir s'il peut agir sur l'objet ou non. Nous avons choisi ici d'utiliser une surbrillance des bords d'un objet en cours de sélection. Il existe aussi une autre ap-



FIGURE 4.8 – Utilisation d'un *highlight* sur une bouteille.

proche appelée *highlight*, qui met en surbrillance l'intégralité d'un objet (Figure 4.8). L'inconvénient de cette technique réside dans l'altération des couleurs de l'objet surligné, c'est pourquoi nous préconisons l'utilisation d'effets sur les contours de l'objet 3D qui permettent de conserver les informations sur les couleurs et la topologie du modèle. Muller (2019) suggère également la mise en place d'un clignotement afin d'attirer l'attention de l'utilisateur sur l'objet virtuel à mettre en avant. Cette modalité est pertinente pour guider l'apprenant, mais utiliser cette approche pour toutes les sélections est trop intrusive par rapport à la surbrillance des bords. En revanche, il peut être pertinent de garder cette méthode pour attirer l'attention de l'apprenant sur un objet virtuel en particulier.

De plus, nous proposons une gestion décentralisée de la sélection d'objets virtuels (Figure 4.9). Nous pouvons tirer avantage de l'approche générique en proposant un système autorisant la gestion de plusieurs modules de sélection en même temps. Ces derniers peuvent changer en fonction du contexte voulu par l'utilisateur ou alors être imposés par le scénario pédagogique. Le *raycast* de sélection est égoцентриque, il émane des mains de l'utilisateur, ces dernières peuvent tenir ce que nous appelons des outils (*devices*).

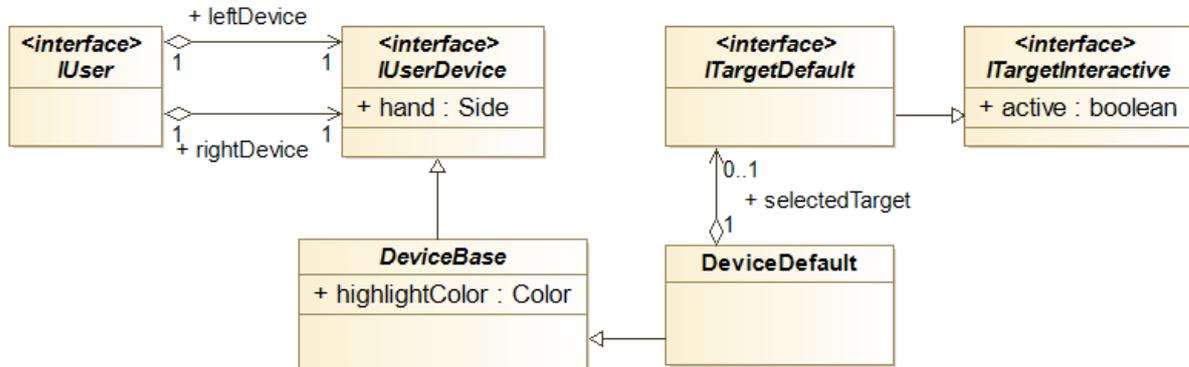


FIGURE 4.9 – Modélisation UML simplifiée de l’approche *Device-Target*. L’outil par défaut (*DeviceDefault*) correspond à la main de l’utilisateur, et il est seulement possible d’interagir (sélection et manipulation) avec cet outil sur les objets de type *ITargetDefault*. L’utilisateur ne connaît pas le type d’outil actuellement en main, car il manipule l’interface *IUserDevice*, ce qui autorise l’implémentation d’une multitude d’outils.

D’un point de vue informatique, chaque *device*, est une implémentation d’une classe abstraite *DeviceBase*. Ce qui autorise chaque instance d’outil à gérer lui même en interne ses différents processus de sélection et de comportement. Par exemple, pour programmer le comportement d’un tournevis, nous pouvons créer le *DeviceScrewdriver* (Figure 4.10) qui remplit la même fonction que l’objet réel, mais au sein de l’EV. Chaque outil est sensible à un ou plusieurs types de cibles bien précises, que nous appelons *target*. Le déclenchement des interactions et les retours visuels sont donc autorisés sur la cible uniquement si l’outil en main est compatible. D’autres paramètres propres à l’outil peuvent être renseignés, comme la distance du *raycast*, la couleur des retours visuels ou encore le comportement en fonction des clics. Cela garantit une plus grande flexibilité pour le concepteur, qui peut jouer sur ces paramètres en fonction du comportement souhaité de l’outil. Si le *raycast* de l’outil touche un objet non autorisé, alors l’interaction n’est pas possible et le retour visuel se comporte comme sur la figure 4.7b. Cette sécurité permet donc de verrouiller les interactions possibles en fonction de l’état de la « main » de l’utilisateur. Pour reprendre l’exemple du *DeviceScrewdriver*, il est sensible uniquement aux cibles de type *ITargetScrewDriver*. Lorsque l’utilisateur n’a pas d’outil dans sa main, nous considérons cette dernière comme étant l’outil par défaut *DeviceDefault*, mais contrairement aux autres, il n’a pas de représentation vi-

suelle. Il s'agit de l'outil de base servant à effectuer l'essentiel des interactions dans le monde virtuel. Comme l'ouverture d'une porte ou encore le fait de prendre un outil en main (déclenchant ainsi un changement d'outil dans la main de l'utilisateur). La figure 4.11 détaille le processus d'action sur une vis à l'aide de l'approche *Device-Target*.

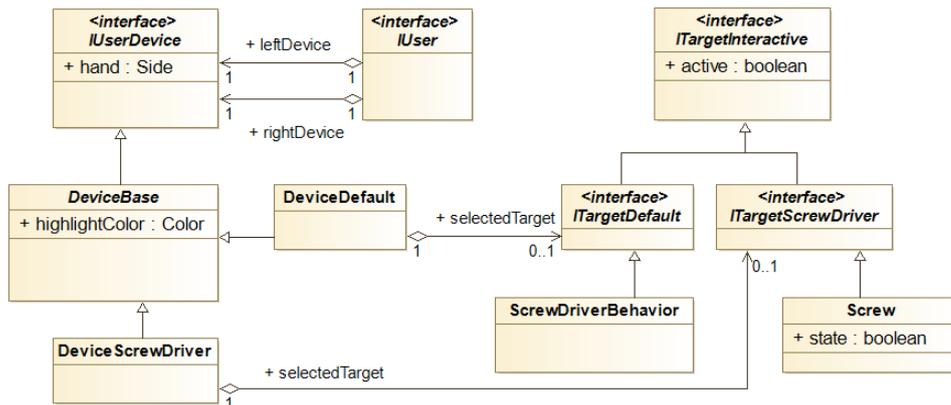


FIGURE 4.10 – Modélisation UML simplifiée de l'implémentation d'un outil tournevis (appelé *DeviceScrewDriver*) en plus de l'outil par défaut. L'objet *ScrewDriverBehaviour* permet de prendre en main l'outil tournevis à partir de l'outil par défaut (*DeviceDefault*). Par la suite, le tournevis peut interagir uniquement avec les objets implémentant l'interface *ITargetScrewDriver*. Au relâchement de l'outil tournevis, l'outil par défaut est de nouveau activé.

Cette approche laisse la possibilité aux concepteurs de créer des comportements spécifiques pour chaque couple *Device-Target*, contrairement à une approche centralisée qui implique de programmer « en dur » les comportements de sélection au détriment d'une maintenabilité satisfaisante. De plus, au moment de la création d'un nouveau scénario pédagogique, lorsqu'un nouvel outil est pensé, le concepteur possède déjà les bases pour concevoir un prototype très rapidement. Par exemple dans le cas d'une application destinée au Bac Pro Commerce, nous avons pu créer grâce à cette approche décentralisée, des outils spécifiques propre au métier enseigné. Comme le *Product Data Terminal* (PDT) qui permet aux apprenants de scanner des produits pour faire un inventaire. L'implémentation suit le même principe que l'exemple de la figure 4.11, améliorant ainsi le temps de développement, car l'approche reste identique pour n'importe quelle implémentation. L'outil gère ensuite lui-même en interne le processus de sélection, ce qui nous permet d'ajouter des comportements spécifiques sans avoir

à éditer le code de base de la brique logicielle de sélection.

4.2.2 Technique de navigation proposée

Pour notre modèle d'EVAH, nous proposons d'utiliser la téléportation (TP) comme technique de navigation. Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre précédent, l'implémentation de la téléportation en elle-même peut changer d'une situation à une autre. Le principe général de fonctionnement de la TP est de pointer un endroit dans le monde virtuel, et lorsque cet emplacement est validé par l'utilisateur, ce dernier se retrouve instantanément déplacé à l'endroit ciblé (Figure 4.12a).

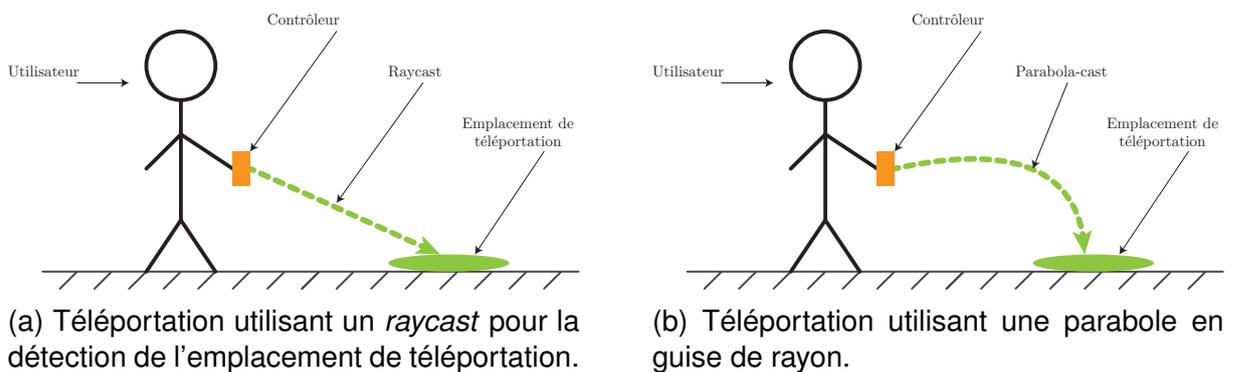


FIGURE 4.12 – Techniques de téléportation.

Dans le cas du HTC VIVE, l'API (*Application Programming Interface*, Interface de Programmation en français) de développement propose une implémentation de la TP avec une distance paramétrable et un rayon en forme de parabole (Figure 4.12b). L'implémentation de base est intéressante, mais nos premiers tests sur le terrain dans le cadre de présentations dans les lycées ont mis en évidence des usages particuliers liés aux profils des élèves de formation professionnelle. Bon nombre d'entre-deux, sous l'effet de la découverte de la RV et de l'amusement que cela procure, utilisent la TP de manière continue. Ils activent la technique de navigation successivement sans prendre un temps de pause entre chaque déplacement. De ce fait, ils arrivent plus rapidement à l'autre extrémité de l'EV. Cela s'effectue au détriment de la prise de repères spatiaux au sein de l'EV, qui est quasiment inexistante en raison du manque d'observation entre chaque TP. L'autre reproche à propos de cette technique vient des

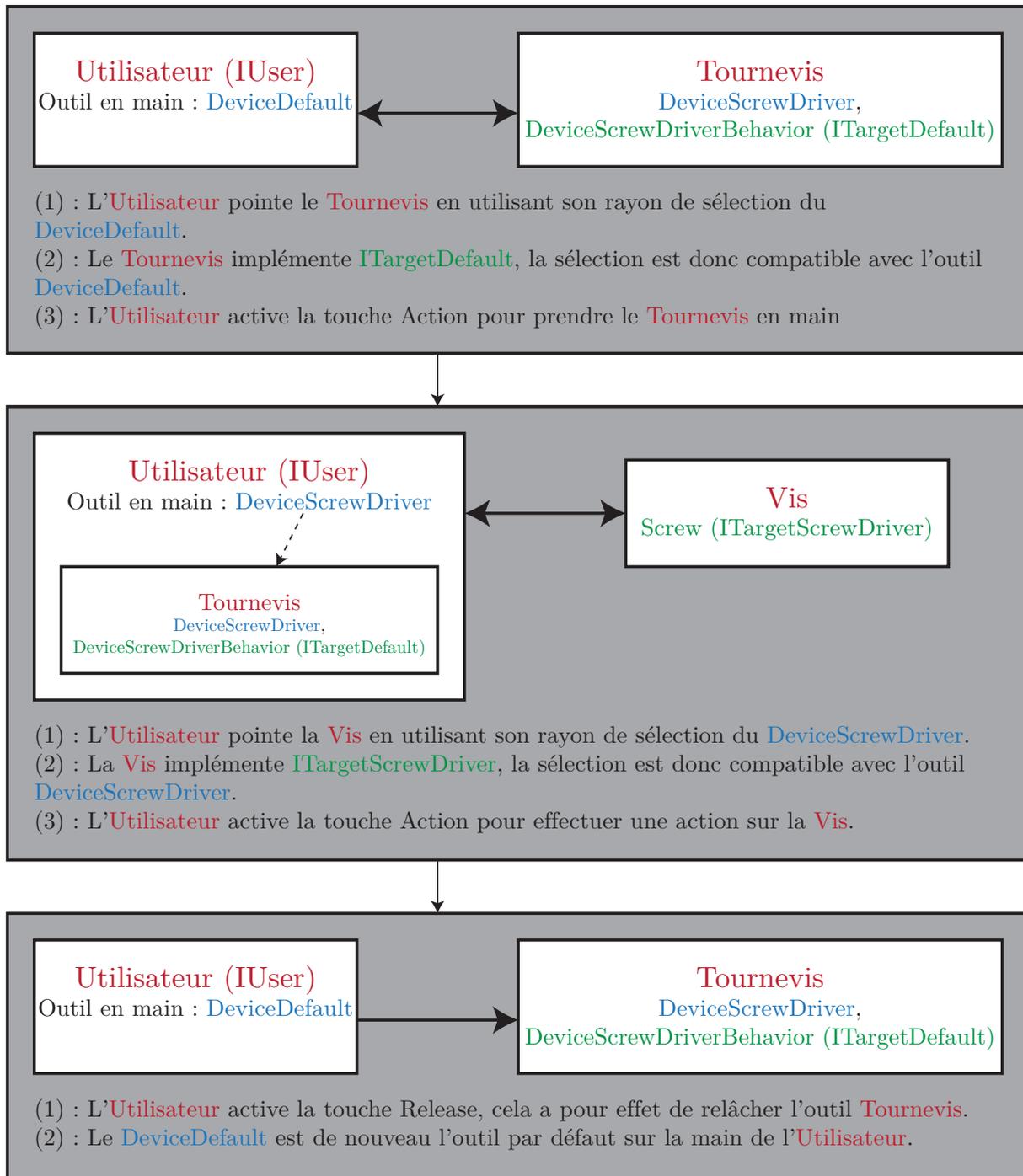


FIGURE 4.11 – Processus d'action sur un objet virtuel de type *Vis* en suivant l'approche *Device-Target*.

enseignants, qui trouvent que la TP peut dans certains cas nuire à l'efficacité pédagogique. En effet, la performance pédagogique de certaines activités repose en partie sur la pertinence des déplacements de l'apprenant. Comme dans le cas d'une gestion de ligne de production où le temps de déplacement entre les lignes de production est crucial pour gérer efficacement les cadences. Il est donc important pour le concepteur de veiller à ce que la téléportation ne gêne pas outre mesure l'activité pédagogique.

Nous proposons donc des améliorations pour la technique de TP. L'objectif ici n'est pas de donner une nouvelle énième technique de navigation, mais de documenter des éléments qui peuvent être bénéfiques à l'utilisateur dans un contexte de formation. La présence d'une parabole nous semble être la meilleure option lorsque l'on utilise la TP. Des auteurs comme Funk *et al.* (2019) mettent également en avant cette implémentation par rapport à l'approche linéaire classique. La parabole permet à l'utilisateur de faire une différence claire entre les retours visuels pour la navigation (parabole) et ceux réservés à la sélection (*raycast*). Cela permet de lever l'ambiguïté sur le rôle de chaque « rayon » utilisé dans les EV (sélection et navigation). Cette parabole est construite progressivement dans le monde virtuel par une succession de *raycast* R , nous permettant de détecter convenablement les collisions avec l'EV. Ce qui nous permet de gérer progressivement les obstacles et en cas de collision, de mettre un retour visuel à l'emplacement du point d'impact de manière à indiquer à l'apprenant pourquoi il n'est pas possible de se téléporter. La gestion de la distance maximale D_{max} est également primordiale pour éviter que l'utilisateur ne se téléporte trop loin. Comme les apprenants vont utiliser la RV de manière ponctuelle, ils peuvent avoir du mal à se repérer dans l'EV. Limiter la distance permet donc à l'apprenant de prendre des repères. Du fait de l'implémentation de la technique de navigation, l'utilisateur ne peut pas tenter de se téléporter au-delà de D_{max} , car la courbe est ramenée dans l'intervalle $[0, D_{max}]$ (Figure 4.13).

L'autre élément que nous proposons porte sur la dimension temporelle de la technique. Bien que la TP soit une approche non continue, nous souhaitons qu'un trajet sur une longue distance prenne plus de temps que pour faire des déplacements courts. De manière à donner aux déplacements superflus, un impact temporel plus important. De ce fait, effectuer un grand nombre d'allers-retours inutiles augmentera le temps passé en RV et peut alors forcer un utilisateur agacé de perdre du temps, à trouver

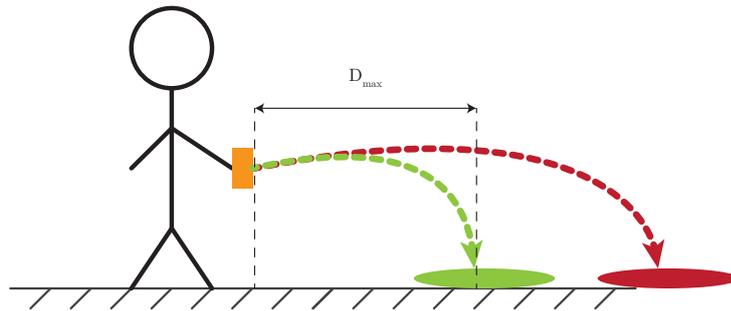


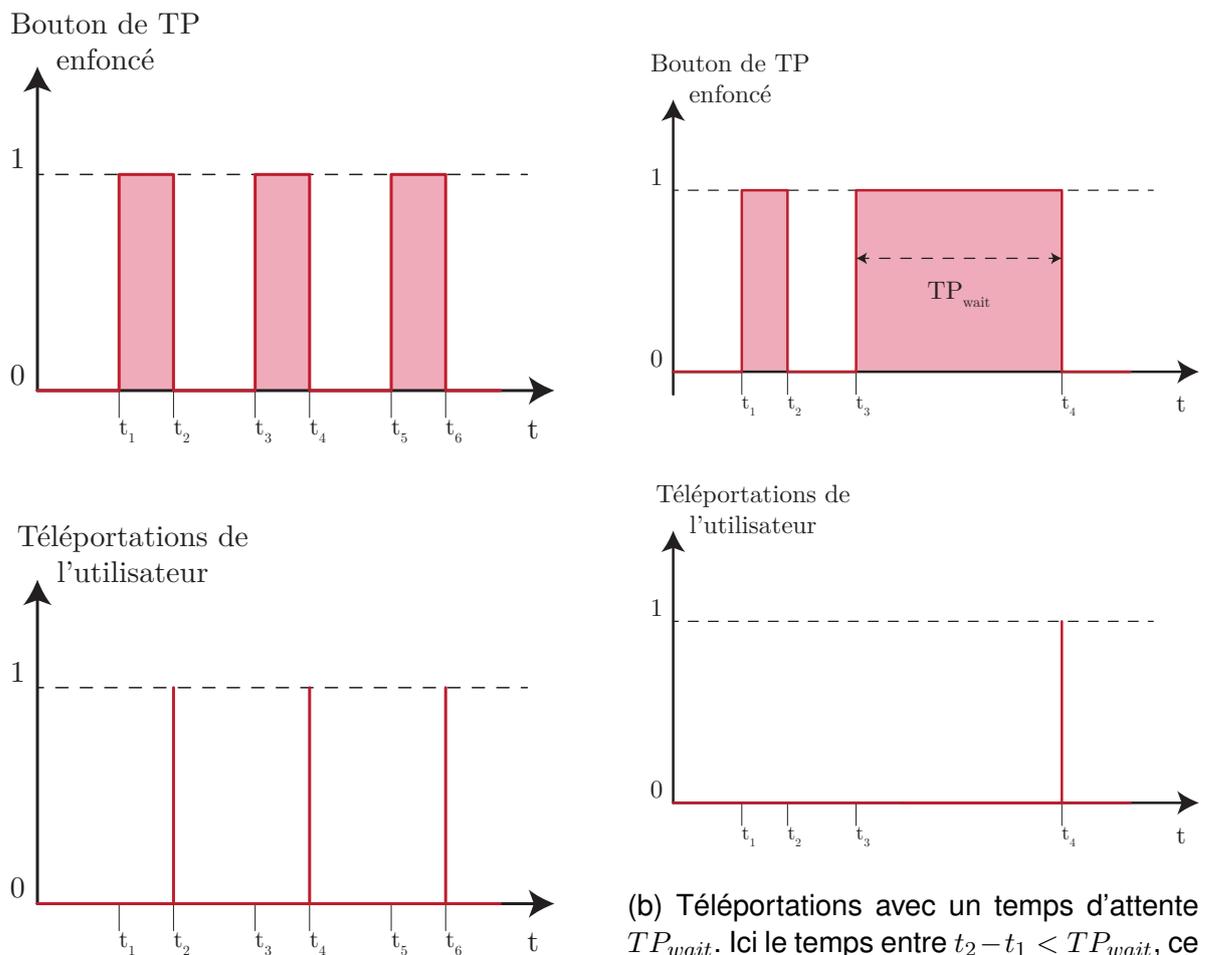
FIGURE 4.13 – Illustration d'un cas spécifique où un utilisateur souhaite se téléporter au delà de D_{max} . La parabole est automatiquement bornée à D_{max} .

une autre stratégie de déplacement. Cette donnée temporelle peut par la suite être utilisée dans un débriefing. Dans notre implémentation de la TP, nous avons mis en place un temps d'attente TP_{wait} pendant lequel se déplacer n'est pas possible (Figure 4.14). Cela est rendu possible grâce à un tracé progressif de la parabole de déplacement. De cette manière, l'utilisateur a un retour visuel de la progression de l'attente. Pour aller plus loin, nous avons aussi fait en sorte que ce temps d'attente soit fonction de la distance. Lorsque les conditions temporelles sont remplies, alors l'utilisateur est libre de se téléporter à l'emplacement souhaité. Ces ajouts temporels sont également accompagnés d'un fondu en noir de l'écran de l'utilisateur, ce qui permet de marquer un temps de pause visible pendant la téléportation et d'éviter des sursauts du point de vue de l'utilisateur. Le processus intégral de TP est décrit dans la figure 4.15¹.

4.2.3 Gestion des obstacles en EV

La manière dont un utilisateur en RV va appréhender la navigation dépend aussi de la présence ou non d'obstacles dans le monde virtuel. Nous utilisons le terme d'obstacle, non pas dans sa qualité d'élément qui va bloquer ou empêcher la navigation, mais plus dans le sens où la présence même de l'obstacle va obliger l'utilisateur à adapter sa stratégie de navigation. En contexte virtuel plusieurs types d'obstacles peuvent exister, comme la présence d'un chariot élévateur sur le trajet, une porte,

1. Une vidéo explicative détaille également ce processus. L'enregistrement a été effectué en utilisant l'approche "Clavier/Souris" pour améliorer la capture vidéo : <https://drive.google.com/file/d/1iHg8wj1WCJqBmDnp8irnWv8vDej9GE08/view?usp=sharing>



(a) Téléportations sans délai d'attente. Cela permet à l'utilisateur d'effectuer plusieurs déplacements successifs rapidement.

(b) Téléportations avec un temps d'attente TP_{wait} . Ici le temps entre $t_2 - t_1 < TP_{wait}$, ce qui ne permet pas de téléporter l'utilisateur. Alors que $t_4 - t_3 \geq TP_{wait}$, ce qui autorise la téléportation.

FIGURE 4.14 – Chronogrammes de la réponse du module de téléportation en fonction de l'état du bouton de téléportation.

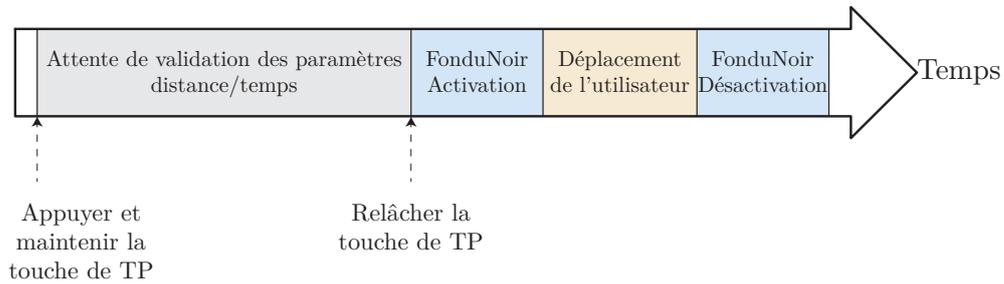


FIGURE 4.15 – Synthèse du processus de téléportation proposé.

ou encore les murs de l'EV. Chacun d'entre eux a un impact différent sur la stratégie de navigation. Nous proposons donc une taxonomie à ce propos (Figure 4.16), qui permet d'identifier différents types d'obstacles. En effet, les utilisateurs réagissent différemment en fonction de ces types. Par conséquent, le lien entre ces réactions et les obstacles permet d'adapter plus précisément la conception des EV et d'optimiser les déplacements des utilisateurs.

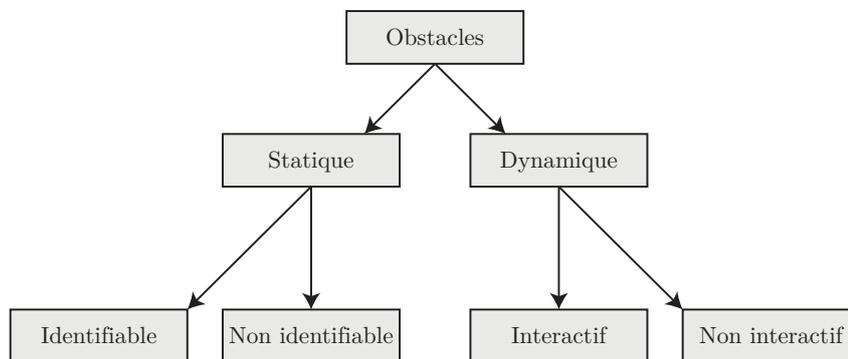


FIGURE 4.16 – Diagramme de la taxonomie des obstacles proposée.

Nous appelons *Obstacle statique* les éléments fixes qui vont obliger l'utilisateur à adapter sa navigation et nous avons distingué deux sous-catégories, à savoir les obstacles *Identifiables* et les obstacles *Non identifiables*. Les premiers sont les éléments du décor, comme les murs ou autres barrières. Ces types d'obstacles sont aisément repérables du fait de leur nature visuelle. Grâce à la modélisation 3D, l'utilisateur peut deviner qu'il s'agit d'un obstacle. Les seconds ne sont pas identifiables visuellement par l'utilisateur, comme les bordures du monde virtuel. Dans un contexte d'EV fermé

comme l'intérieur d'un bâtiment, le recours aux obstacles immatériels pour délimiter l'environnement n'est pas nécessaire. Cependant, dans un monde extérieur et ouvert, l'utilisateur ne peut pas naviguer à l'infini, des barrières fictives sont donc placées. Ce type d'obstacle invisible est connu de l'utilisateur seulement lorsqu'il est confronté à cet obstacle. Dans un tel cas, l'utilisateur doit alors rebrousser chemin, ce qui cause des déplacements superflus, et donc une perte de temps. Par ailleurs, l'utilisateur peut prendre conscience de ces obstacles si le concepteur a placé des éléments de décors simulant une limite comme un océan, du relief ou des bâtiments. Nous préconisons l'utilisation d'obstacles identifiables afin de mieux mettre en valeur les limites du monde virtuel pour l'apprenant.

Nous avons ensuite les obstacles dits *Dynamiques* qui regroupent les éléments du monde virtuel qui sont susceptibles d'évoluer géographiquement et morphologiquement au cours de la simulation. Nous faisons deux distinctions, à savoir les obstacles *Interactifs* et les obstacles *Non interactifs*. Les premiers constituent les éléments sur lesquels l'utilisateur a une possibilité d'action. Par exemple, une porte fermée constitue un obstacle, mais l'utilisateur peut s'il le souhaite l'ouvrir puis naviguer. L'utilisateur contrôle donc l'état de l'obstacle qui peut être résumé à un état « ouvert » ou « fermé ». Dans le cas du second type, il s'agit d'obstacles sur lesquels l'utilisateur ne peut pas agir, mais contrairement aux *Statiques identifiables*, ils peuvent bouger, évoluer au cours de la situation virtuelle. Cela peut être la présence d'un chariot élévateur sur le trajet, ou d'un agent pédagogique incarné qui bloque le passage. Changer l'état de l'obstacle requiert donc soit une action indirecte de la part de l'utilisateur, comme la validation d'une tâche qui a pour effet de déverrouiller une porte de l'EV. Soit un temps d'attente, comme dans une situation de remplissage de matière première dans une activité de pilotage de ligne de production, ou alors le changement d'état d'un obstacle peut être aléatoire. Ce type d'obstacle est utile pour forcer des actions ou des temps d'attentes, notamment dans un contexte d'apprentissage d'une tâche, où on peut vouloir que l'élève complète une tâche avant de pouvoir naviguer ailleurs dans l'EV.

Cette taxonomie sur les obstacles nous aide à mieux comprendre les comportements possibles dans un EV. Par exemple dans le cas d'une forte présence d'obstacles *Statique Non-identifiables*, on peut s'attendre à ce que l'utilisateur passe un temps important à effectuer des déplacements superflus lorsque qu'il rencontre un obstacle. De

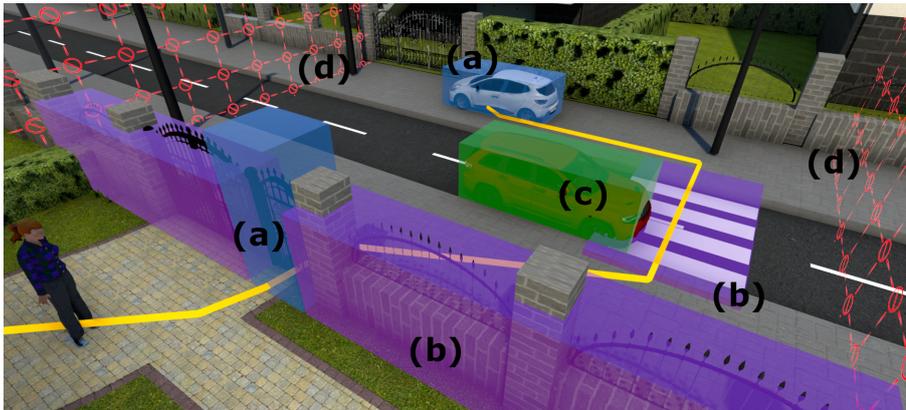


FIGURE 4.17 – Exemple d'obstacles dans une situation virtuelle.

plus, le public ciblé dans ces travaux de recherche a tendance, selon les enseignants à tester les limites de l'activité. Dans le cas de la RV, il s'agit de tester les possibles détournements de la situation d'apprentissage. C'est pourquoi nous pensons que les obstacles non identifiables sont à éviter, car les élèves peuvent être tentés d'explorer l'EV au lieu de faire l'activité pédagogique. Pour le concepteur, cette taxonomie peut aider à mieux concevoir le monde virtuel en remplaçant par exemple les bordures du monde par des obstacles visibles, ou encore en ayant recours à des obstacles dynamiques interactifs pour guider l'apprenant dans l'apprentissage de la tâche.

4.2.4 Déplacement d'objets

Parmi les interactions dans un EVAH, il y a le déplacement d'objet. Nous distinguons cette interaction des autres, car elle est transversale et prédominante dans certains scénarios virtuels pour la formation professionnelle, comme les activités pour le Bac Pro Commerce avec la mise en rayon ou la préparation de commande (section 6.1). En effet pour ce diplôme particulier, les activités reposent sur de la manipulation et du placement de produits. Dans une activité de balisage sur un chantier, l'apprenant effectue également un nombre important de déplacements d'objets afin de sécuriser son espace de travail. Il en est de même pour des activités où du matériel doit être déplacé d'un camion ou local technique vers la zone de travail.

Il est possible de déplacer un objet 3D en utilisant le moteur physique des éditeurs

de contenus, ce qui permet d'appliquer à un objet donné des forces comme la gravité. Les implémentations pseudos réalistes de la physique sont intéressantes, car le concepteur n'a pas besoin de programmer des équations de mouvements précises. Il lui suffit d'utiliser les éléments génériques existants. Pour l'apprenant cela garantit un certain degré de réalisme, simplifiant la compréhension de la méthode de déplacement. En revanche, l'utilisation d'une physique simulée peut poser des problèmes, en raison de la fiabilité et de la répétabilité discutable de ces systèmes. Les moteurs physiques sont non déterministes en raison de l'ordre d'appel des fonctions qui peut différer d'une machine à l'autre. Par ailleurs, la précision des calculs utilisant des nombres flottants peut dans certains cas engendrer des erreurs de détection de collisions lors d'une session virtuelle. Il est donc compliqué de prévoir le comportement des objets lorsqu'ils utilisent la physique, car il repose sur une approche non déterministe ainsi que sur les actions de l'utilisateur. Une erreur dans la gestion de la physique peut entraîner des situations étranges et parfois bloquantes pour l'utilisateur. Par exemple si l'utilisateur doit déplacer un objet important dans le scénario pédagogique, il ne faut surtout pas que le processus de placement se fasse mal sous peine de devoir recommencer l'activité ou de perdre du temps à corriger le problème. Un autre inconvénient de la physique simulée réside dans son utilisation par les élèves. Pour les apprenants qui découvrent la RV, le fait de pouvoir jeter ou d'empiler des objets peut être une source d'amusement, les détournant ainsi du but principal : l'apprentissage. Les enseignants nous ont indiqué qu'il s'agissait d'une pratique assez courante en formation professionnelle, où dès qu'un outil pédagogique peut être détourné vers des usages ludiques, les élèves se précipitent dans cette direction. Pour le déplacement d'objets, une autre approche peut être envisagée.

Dans la littérature, Goesele et Stuerzlinger (1999) détaillent une approche de placement d'objets par contrainte extraite des logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO² ou CAD³ en anglais). Le principe de placement repose sur des règles précises où des objets possèdent deux types de zones, des *offer areas* qui sont des zones où d'autres objets peuvent être placés, et des *binding areas* qui peuvent se connecter aux *offer areas* (Figure 4.18). Une implémentation de ce système est détaillée dans Smith et Stuerzlinger (2001) et une comparaison du mode de déplacement avec et

2. Conception Assistée par Ordinateur

3. Computer Aided Design

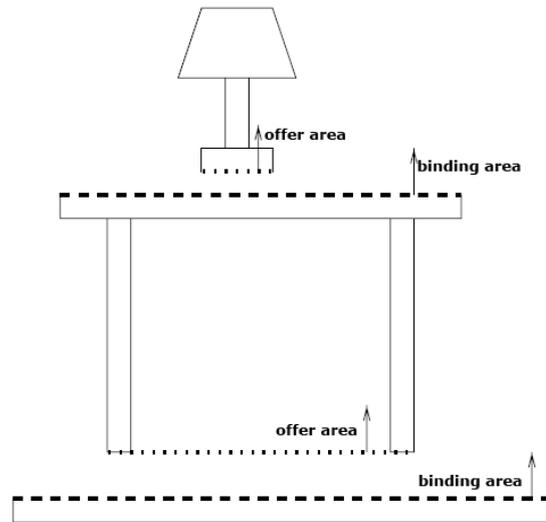


FIGURE 4.18 – Zones de placement décrites dans le module de déplacement d'objets par contraintes décrit par Goesele et Stuerzlinger (1999).

sans contrainte est également détaillée dans l'article de Salzman *et al.* (2001).

Cette approche issue de la CAO est intéressante, car elle permet d'assister l'utilisateur et de simplifier le processus de placement d'objets tout en limitant les abus, de même que les situations aberrantes ou ludiques. Nous avons donc choisi d'implémenter un système similaire pour la RV pour les raisons suivantes :

- **Simplifier le processus de placement.** Notamment en utilisant que deux boutons et en mettant en place des retours visuels et haptiques pertinents.
- **Restreindre les possibilités de placement.** Afin d'éviter les situations trop ludiques et gagner du temps d'exécution.
- **Permettre un placement précis.** C'est notamment important pour les utilisateurs ayant une moins bonne dextérité avec les contrôleurs.
- **Proposer un module réutilisable** dans toutes les situations, que ce soit plus déplacer un carton, placer une vis ou un enjoliveur sur une prise électrique.

- **Améliorer le temps de paramétrage.** Pour le concepteur dans l'éditeur de contenu.

Le module que nous proposons peut être représenté de manière simplifiée à l'aide d'un diagramme UML (Figure 4.19). Les composants principaux y sont représentés et nous pouvons plus précisément détailler les éléments suivants :

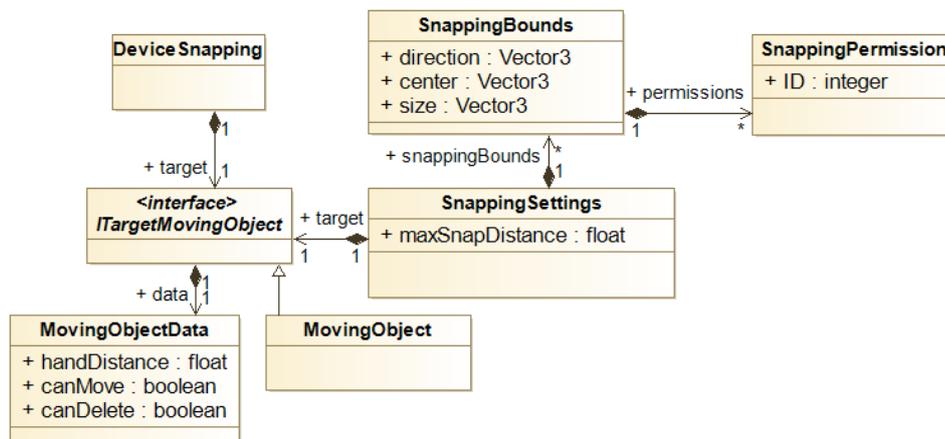


FIGURE 4.19 – Diagramme de classe simplifié du module de *Snapping*.

- Les objets déplaçables, notés O , qui implémentent l'interface *ITargetMoveObject*.
- Les surfaces S sur lesquelles $[1, n]$ O peuvent être placés. Il s'agit d'objets de type *SnappingSurface*.
- Les outils, D , qui permettent d'effectuer le processus de placement de O sur S . Ce sont des objets de type *DeviceSnapping*. L'outil D est invisible et abstrait, au même titre que le *DeviceDefault* en raison du besoin de généralité du processus de déplacement.

Ce module repose sur un système de permissions, nous avons choisi de considérer qu'une partie spécifique d'un objet ne peut être placée sur une autre que si certaines conditions sont remplies, similairement à l'approche de Goesele et Stuerzlinger (1999). Ces parties spécifiques sont renseignées sur les objets O , et nous les appelons *SnappingBounds* Sb . Il s'agit de zones encapsulant $[0, n]$ points du maillage

de la représentation graphique de O de manière à ce que le placement corresponde parfaitement à la topologie du modèle 3D. Chaque zone de placement est accompagnée de données permettant de la caractériser. Nous avons par exemple les permissions de placement $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$, qui sont entièrement paramétrables par le concepteur dans le script *SnappingPermissions*, ou encore des données géométriques, comme le barycentre des points concernés ou la normale de cette zone qui sera utilisée pour l'orientation de l'objet O . Le déplacement repose donc sur le fait de coller un Sb spécifique sur une surface S compatible. Cela assure un placement précis et cohérent en fonction des permissions P spécifiées. La figure 4.20 illustre un objet (une étagère) qui comporte plusieurs Sb , mis en évidence dans l'éditeur par des tracés de couleur, d'autres éléments comme les normales sont également tracés.

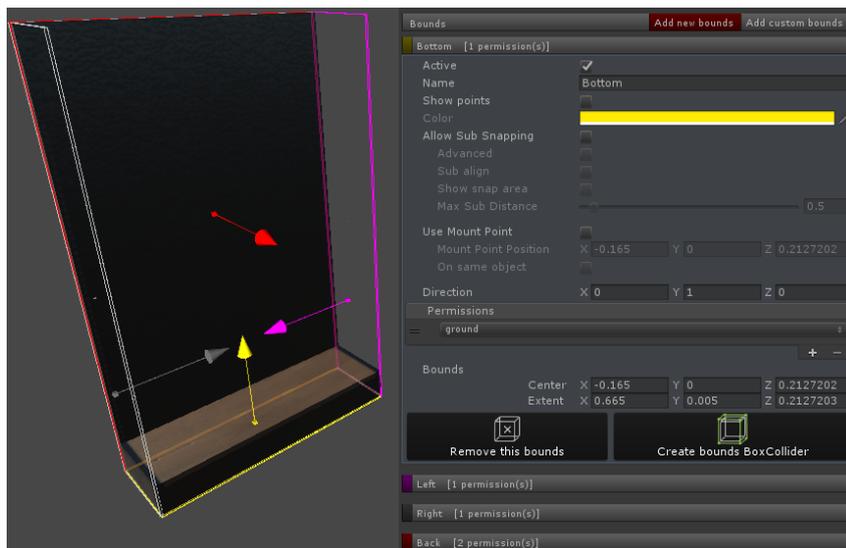


FIGURE 4.20 – Vue éditeur de la mise en place des scripts du module de déplacement dans *Unity3D*.

Pour pouvoir placer un objet O sur une surface S , l'utilisateur doit utiliser un outil D qui utilise un ensemble de conditions $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_n\}$ pour déterminer si le placement est autorisé ou non. Ces conditions C , en plus prendre en compte les données de permissions P de l'objet en cours de déplacement et la surface S pointé par l'utilisateur, regarde également si des conditions géométriques sont remplies. Cela est possible en prenant en compte les données issues du *raycast* utilisé par D . Les données de ce *raycast* R , permettent de valider ou non les conditions d'orientation vis-

à-vis de la surface pointée. C'est notamment important lorsque l'orientation d'un objet est obligatoire pour garantir de la cohérence, comme l'illustre la figure 4.21, où l'on souhaite poser un objet O_{vase} sur une table S_{table} . Deux cas sont mis en avant, le premier, (a), montre une situation où toutes les conditions sont validées c'est-à-dire que $C(P_{O_{vase}}, P_{S_{table}}, R1)$ est valide. Dans l'autre cas (b), l'utilisateur pointe une autre face de la surface S_{table} , ce qui a pour effet de ne pas placer l'objet O_{vase} sur la table, car la condition $C(P_{O_{vase}}, P_{S_{table}}, R1)$ n'est pas validée. Seuls les paramètres de permissions sont valides, mais les normales ne le sont pas.

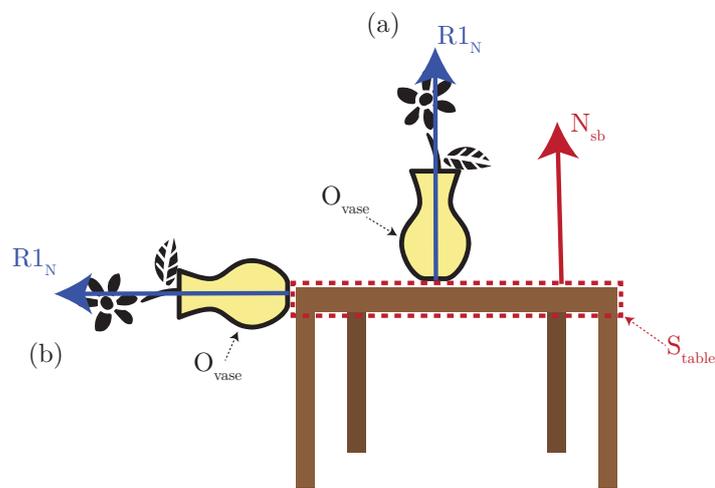


FIGURE 4.21 – Illustration de l'importance de prendre en compte les normales, afin d'éviter de placements incohérents.

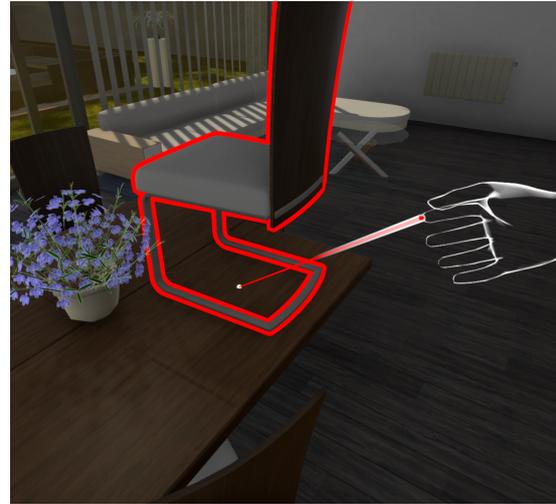
Lorsque les conditions C sont validées par l'outil D , alors le rayon change de couleur et de retour visuel pour indiquer qu'il s'agit d'un placement potentiel valide (Figure 4.22a). Dans le cas inverse, un retour visuel indique que le placement n'est pas possible (Figure 4.22b).

De multiples combinaisons de paramètres sont possibles et cela permet grâce à un seul et même module de gérer des placements complexes, comme la création d'étagères pour une activité de mise en rayon ou encore la pose d'éléments de balisage pour sécuriser une installation électrique.

Nous pouvons aussi aborder la mise en place de contraintes multiples, où un ob-



(a) Retour visuel indiquant que le placement de l'objet est autorisé.

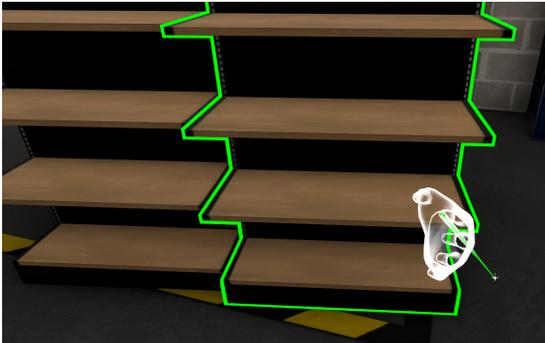


(b) Retour visuel indiquant que l'objet n'est pas autorisé à être placé sur la table.

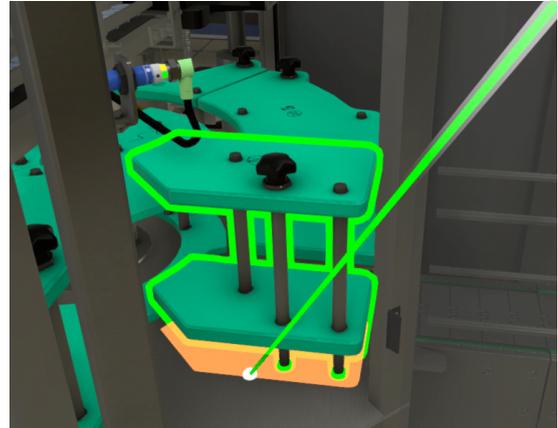
FIGURE 4.22 – Placement d'objets dans le monde virtuel en utilisant le module de *Snapping*.

jet précis $O1$ peut contenir plusieurs $Sb = \{Sb1, Sb2\}$, contenant respectivement des permissions $P1$ et $P2$. Classiquement, $O1$ peut se placer sur des surfaces S_x répondant aux contraintes des Sb présentes sur $O1$. Il est également possible de rajouter une nouvelle contrainte sur ce premier placement de $O1$ sur S_x . À savoir si une autre surface S_y se trouvant dans la zone d'influence d'un des Sb restant, alors le placement actuel peut être ajusté en suivant cette nouvelle contrainte. $O1$ se trouve donc placé à fois sur S_x et S_y automatiquement. Cette modalité est notamment pertinente dans le cas d'un placement d'une étagère au sol, où en plus d'être collée au sol, cette dernière peut être collée sur une autre étagère voisine (Figure 4.23a). Pour l'élève ce genre contrainte de placement est approprié, car cela l'aide à placer rapidement et efficacement l'objet en cours de manipulation.

Nous appliquons les mêmes principes pour le concept de points de montages (*MountPoints*). Il s'agit d'un cas spécifique où un objet peut-être automatiquement placé à une position et orientation spécifique. La figure 4.23b illustre ce genre de cas où une étagère est automatiquement placée au bon endroit avec la bonne orientation. Cette approche est efficace pour placer rapidement des objets qui comportent des exigences de position et de rotation. Cela est notamment pertinent dans des situations où il faut placer précisément des pièces, comme dans une machine industrielle.



(a) Utilisation de sous-contraintes aimantées. Le système colle automatiquement l'objet en cours de déplacement à l'autre étagère détectée.



(b) Utilisation d'un point de montage pour placer un élément d'une machine industrielle. La pièce est automatiquement placée dans la bonne orientation et au bon endroit sur la machine. Limitant ainsi les actions requises de la part de l'apprenant.

FIGURE 4.23 – Exemples d'utilisation des fonctions avancés du *Snapping*.

Ce module de déplacement par contrainte autorise différents niveaux d'assistance. En plus de bénéficier à l'utilisateur, cela permet également aux enseignants de spécifier plus précisément les comportements de certains objets au moment de la conception du scénario pédagogique. En effet, connaître les comportements possibles des objets virtuels peut aider les enseignants dans leur choix de séquençage pédagogique, car ils peuvent se projeter plus facilement dans les usages que pourront avoir les apprenants dans le scénario en cours de conception. Par exemple dans le cas d'une activité de changement de format sur une machine industrielle, les enseignants peuvent indiquer dans le déroulé de l'activité que le placement des pièces est basé sur les points de montages. De manière à faciliter le changement de format. Ou encore les enseignants peuvent demander au concepteur de mettre en place des contraintes sur le placement de gondoles dans une activité de préparation de rayon, de manière simplifiée le processus de disposition des gondoles. Ce module constitue donc une première étape d'étayage dans le monde virtuel, où le processus de déplacement d'objets est géré au maximum par le système, afin de donner plus de temps à l'utilisateur pour effectuer d'autres actions plus pertinentes pour l'apprentissage visé au sein de l'EV.

4.2.5 Mode tutorat synchrone

Nous avons fait le constat que le monde virtuel était visible uniquement par l'apprenant en immersion. L'unique retour visuel pour un observateur est l'écran de l'ordinateur sur lequel l'utilisateur utilise le visiocasque. Il s'agit de l'approche par défaut proposée par les API de développement (SteamVR ou Oculus). Bien entendu, l'utilisation première des visiocasques est avant toute pensée pour une personne en immersion, et non les observateurs. Compte tenu de cela, il n'est pas possible de mettre en place directement une situation d'accompagnement efficace pour un enseignant non immergé.

Un autre élément constaté sur le terrain est la présence de cybermalaises pour les personnes regardant l'écran affichant le point de vue de l'utilisateur utilisant le casque. Nous proposons donc d'utiliser cet espace passif pour le transformer en poste interactif, appelé « poste de tutorat », sur lequel l'enseignant peut changer de point de vue, agir sur la scène virtuelle, ou encore guider l'apprenant.

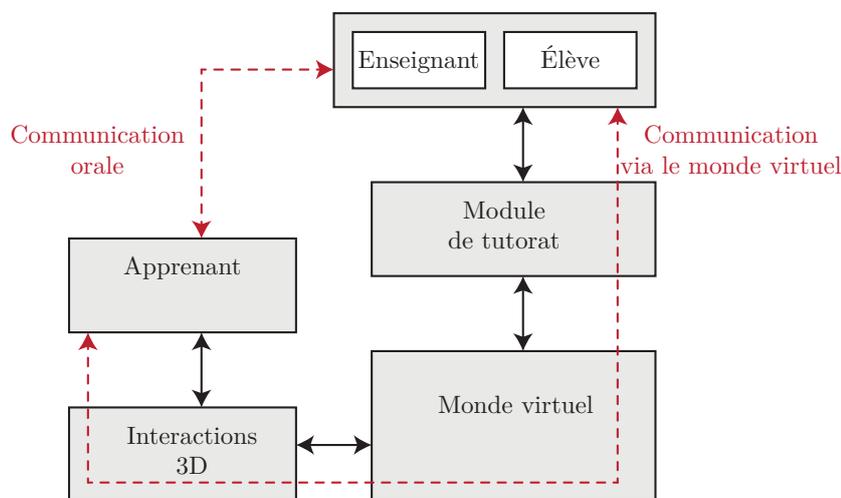


FIGURE 4.24 – Représentation schématique du module de tutorat au sein du scénario virtuel. Des types de communications sont possibles, à l'oral ou via le système immersif.

Ce module est pensé pour être un autre point d'entrée dans le monde virtuel en plus de celui occupé par l'utilisateur en immersion (Figure 4.24). Il garantit également un nouveau canal de communication entre le spectateur et l'utilisateur en immersion.

Ce canal utilise l'application comme moyen de communication, grâce aux interactions virtuelles proposées par le poste de tutorat. De nouvelles modalités pédagogiques sont possibles dans ce nouvel espace pour l'enseignant :

- **Assistance** : L'enseignant dispose d'outils pour guider ou interagir dans le monde virtuel.
- **Exploitation pédagogique externalisée** : Le poste de tutorat est physiquement localisé dans la même pièce que l'utilisateur en immersion (il s'agit du PC utilisé par l'utilisateur en immersion), par conséquent le tuteur est proche de l'apprenant en immersion. Alternativement, nous proposons de projeter l'écran du poste de tutorat dans une ou plusieurs autres salles, par exemple afin que l'enseignant puisse mettre en place des nouvelles modalités d'exploitation de l'outil virtuel en classe entière sans déranger l'apprenant en immersion.
- **Préparation du débriefing** : Nous proposons d'autres points de vue de la simple vue à la première personne de l'utilisateur en immersion. L'enseignant peut prendre du recul et observer la zone de travail dans sa globalité. C'est une méthode pertinente d'un point de vue pédagogique, car le tuteur peut déceler des problèmes que l'utilisateur peut ne pas forcément voir, par manque de recul.

En plus d'une utilisation par l'enseignant, ce module peut également être utilisé par un autre élève, permettant ainsi un tutorat par les pairs. Des situations de collaboration et de coopération sont donc possibles entre l'apprenant en immersion et celui utilisant le poste de tutorat. Les modalités suivantes sont donc envisageables :

- **Découverte des interactions et de l'EV** : Un apprenant qui a déjà utilisé le dispositif immersif peut aider celui en immersion à utiliser les manettes ainsi que les interactions virtuelles. Le poste de tutorat autorise également son utilisateur à disposer des guides virtuels pour guider l'apprenant en immersion, par exemple dans le cas où ce dernier ne connaît pas monde virtuel. Ce guidage peut aussi se faire à propos des différentes étapes de l'activité pédagogique, de manière à éviter que l'apprenant en immersion ne se retrouve bloqué lors de la réalisation de l'activité pédagogique.

- **Coopération entre deux élèves** : L'apprenant coopérateur et en immersion effectuent chacun des tâches différentes dans le but de compléter l'activité pédagogique dans le même EV. Grâce à l'approche *Device-Target* il est possible de créer des interactions réalisables uniquement par un type d'utilisateur précis (immersif ou tutorat), garantissant ainsi une situation de coopération efficace.
- **Collaboration entre deux élèves** : Plusieurs aspects collaboratifs sont envisageables ici, soit sous la forme d'assistance de l'utilisateur en immersion, ou alors sous la forme de codirection. Les deux utilisateurs agissent conjointement pour réussir l'activité pédagogique.

Ce module répond également à une problématique très présente au sein des établissements lorsque le numérique, plus particulièrement la RV est mise en place. Ces nouveaux moyens d'enseignements représentent un coût non négligeable et les lycées s'équipent généralement d'un ou deux systèmes. De par la nature même des équipements de RV, un poste informatique ne peut être utilisé que par un seul apprenant. Ce n'est pas un investissement facilement rentable pédagogiquement, à moins d'investir dans une classe complète virtuelle, ce qui n'est pas toujours possible financièrement et logistiquement pour les établissements. Le module de tutorat répond en partie à ces problèmes, en proposant une modalité qui peut permettre à plusieurs utilisateurs d'exploiter l'outil numérique en même temps.

D'un point de vue technique, le mode tutorat synchrone est un second utilisateur, qui peut voir et interagir avec l'utilisateur en immersion par le biais d'une interface graphique comportant toutes les options nécessaires (Figure 4.25). Cela impose une complexité informatique plus élevée, car le concepteur doit gérer deux utilisateurs dans la même scène virtuelle et sur la même instance de l'application. Les approches de programmation sont donc à choisir précisément, comme la gestion des inputs, des retours visuels ainsi que des modalités d'interactions 3D pour ce nouvel utilisateur. À l'inverse, l'utilisateur en immersion ne peut pas voir l'utilisateur sur le poste connecté. Les interactions sont similaires et utilisent les mêmes briques logicielles que pour l'apprenant en immersion, mais elles sont adaptées au couple clavier/souris utilisé par ce poste. C'est pourquoi nous considérons ce module comme étant incontournable pour une uti-

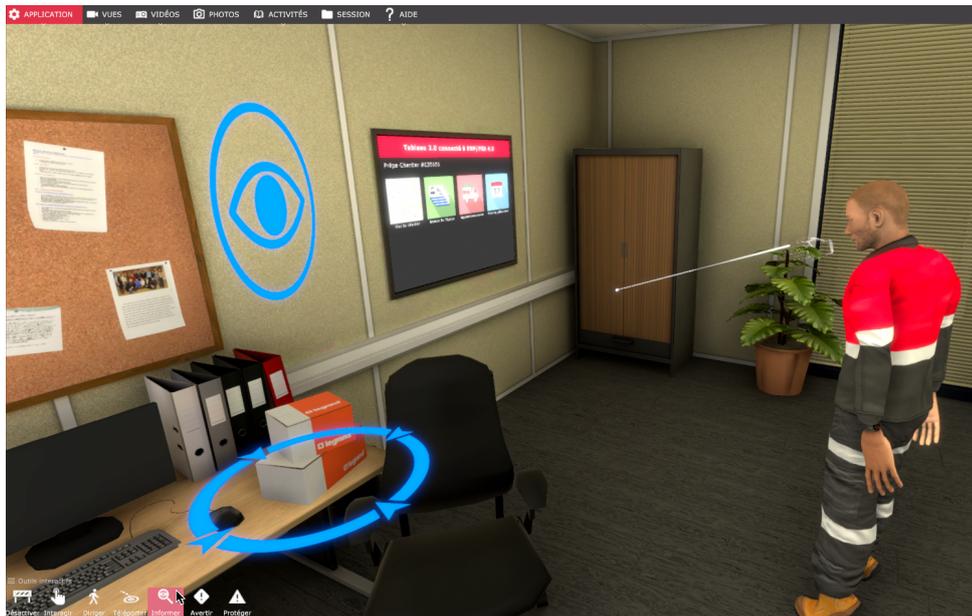


FIGURE 4.25 – Vue de l'écran du poste de tutorat synchrone sur lequel un autre utilisateur a indiqué à l'apprenant en immersion de regarder les boîtes sur le bureau à l'aide d'un outil de tutorat.

lisation pédagogique de la RV. En effet, en contexte d'apprentissage, les utilisateurs peuvent avoir besoin d'assistance et le poste de tutorat garantit une assistance « non intrusive ».

4.3 Modules d'accompagnement

La seconde partie de notre modèle (Figure 4.26) est destinée à embarquer des moyens d'assistance de l'utilisateur dans l'EVAH. Nous allons ici détailler les éléments principaux qui nous ont permis de mettre en place nos premiers scénarios pédagogiques virtuels.

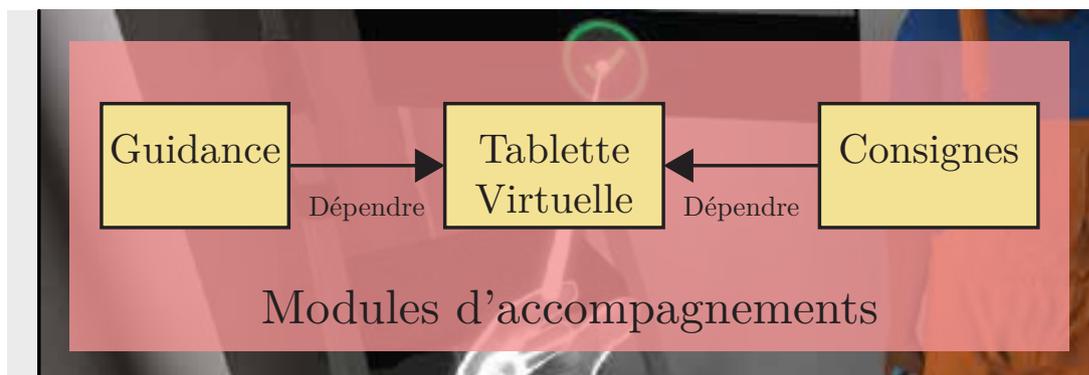


FIGURE 4.26 – Vue d'ensemble schématique des modules d'accompagnements abordés dans cette section.

4.3.1 Tablette virtuelle

L'une des problématiques soulevées par les enseignants porte sur l'accompagnement des apprenants en immersion. Dans les établissements, l'utilisation de la RV sera ponctuelle, à cause des contraintes d'emploi du temps, de stages, des effectifs ou encore de la disponibilité du matériel. Par conséquent, les élèves auront généralement un profil de novice vis-à-vis de la situation pédagogique, mais également à propos de l'utilisation des interactions 3D. Les conséquences peuvent être multiples, comme un temps plus important pour réaliser l'activité, une perte d'orientation dans l'EV, surtout si ce dernier est imposant et grand. Par ailleurs, cela peut engendrer une perte de motivation voire l'abandon si l'activité est trop complexe.

Il peut donc être justifié de proposer une ou plusieurs solutions permettant de guider et d'assister l'apprenant dans la situation pédagogique. Dans la littérature scientifique, il est fait référence aux agents pédagogiques virtuels (*PVA*). Dans une situation professionnelle virtuelle, ces agents peuvent avoir une posture de chef ou de maître de stage, donnant les informations dont l'utilisateur a besoin de pour réaliser l'activité pédagogique (Wasfy *et al.*, 2005). Nous choisissons de nuancer deux types d'usages des PVA :

- Les personnages virtuels autonomes, nous employons ici le terme « agent » pour les qualifier. Il s'agit des agents qui comportent de hauts niveaux d'autonomie ainsi que des processus cognitifs tels que décrits dans le moteur *RE-*

PLICANT de Lhommet (2012) ou ceux qui servent à guider l'apprenant dans la réalisation de la tâche pédagogique en proposant diverses modalités d'assistance.

- Les avatars de contexte, nous employons ici le terme « avatar ». Il s'agit de personnages virtuels qui font partie intégrante du contexte pédagogique, mais qui n'ont pas pour objectif d'assister l'apprenant, ni même d'être autonomes. Ils assurent une fonction précise dans le scénario pédagogique, par exemple un avatar qui a pour unique but de donner un ordre d'intervention ou encore d'indiquer à l'apprenant un aléa spécifique (Figure 4.27). Le comportement de ces avatars ne demande pas de conception comportementale avancée, mais une approche par une simple machine à état sans aucune autonomie.

Comme nous venons de le discuter dans l'état de l'art, l'emploi d'agents autonomes dans notre cas d'étude n'est pour le moment pas pertinent dans le cas de situations pédagogiques présentes dans les lycées professionnels. En revanche, certaines activités pédagogiques demandent quand même la présence d'avatars. Ces derniers s'inscrivent dans la catégorie des avatars de contextes et font intégralement partie du contexte pédagogique, c'est-à-dire que la cohérence de l'activité repose en partie sur leur présence. Les interactions entre l'apprenant et l'avatar s'effectuent par le biais de prompts de dialogue. De plus, ils sont juste présents pour une action ponctuelle dans le déroulé de l'activité. Ces avatars ne permettent pas la mise en place d'une assistance quelconque dans la réalisation de l'activité par l'apprenant.

Pour certaines interactions 3D, le réalisme peut avoir un impact important sur le temps passé dans l'EV ainsi que sur la quantité de déplacements à effectuer. Par exemple dans une activité de préparation de commande, l'apprenant doit pouvoir prendre des objets précis de même qu'imprimer des documents. Une approche réaliste revient à demander à l'apprenant d'aller chercher les cartons, de même qu'aller imprimer les documents d'expédition. Ce dernier point se réalise depuis un poste informatique présent à un endroit spécifique de l'EV. Ce qui implique pour l'apprenant de savoir où se trouve le poste informatique en question, de naviguer jusqu'à ce dernier, puis de faire la procédure d'impression. Dès que toutes ces étapes sont réalisées, l'apprenant doit ensuite retourner près de sa palette en préparation pour continuer l'activité. Le temps



(a) Exemple de dialogue avec un avatar de contexte réalisé grâce à une bulle de dialogue flottante dans l'espace 3D. La validation de ce dialogue permet d'indiquer que l'apprenant a pris connaissance du problème.



(b) Avatar qui donne des instructions et un document à l'apprenant. Cette action est ponctuelle et présente en début d'activité.

FIGURE 4.27 – Exemples de situation où la présence d'avatar de contexte est justifiée par le scénario pédagogique.

et les efforts ici fournis par l'apprenant pour effectuer toutes ces étapes ne sont pas justifiés d'un point de vue pédagogique. C'est pourquoi un étayage est ici nécessaire pour réduire la complexité de ces tâches peu pertinentes pour l'apprentissage visé.

Nous proposons donc une approche qui permet de centraliser à la fois les modalités d'assistances qu'un *PVA* peut prodiguer, ainsi que les différents processus d'étayages mis en place dans le monde virtuel. Par exemple en proposant sur le même outil la possibilité d'accéder à des instructions, d'imprimer des documents ou encore la présence d'un inventaire. Ces interactions s'effectuent sur une interface 3D diégétique présente dans le monde sous la forme d'une tablette virtuelle (Figure 4.28).

Cette métaphore est intéressante, car les élèves manipulent déjà ce genre d'outils que ce soit en formation, ou en situation professionnelle pour certaines filières. Cela permet de mieux intégrer cette métaphore, nous avons souhaité implémenter une interface diégétique afin de ne pas perturber plus que nécessaire l'apprenant. La représentation de l'outil sous forme de tablette virtuelle nous permet d'éliminer les problèmes liés au réalisme de la modélisation, de comportement, de même que les éléments potentiellement distrayants liés aux agents. La métaphore visuelle a été agrandie



FIGURE 4.28 – Sélection des éléments de la tablette virtuelle via le *raycasting*. Cet écran permet à l'apprenant de faire apparaître des objets dans le monde virtuel directement depuis la tablette.

pour permettre une meilleure lisibilité, et il est possible pour l'utilisateur de prendre à la main la tablette, autorisant les interactions n'importe quand pendant la simulation pédagogique. L'interface de la tablette autorise donc l'apprenant à effectuer des actions complexes en seulement quelques clics sur l'interface. Par exemple, l'impression de documents peut s'effectuer directement depuis la tablette grâce à l'application « Imprimante ». Nous qualifions ici l'étalement prodigué par la tablette de « fort », car contrairement aux simplifications reposant sur de l'automatisation ou des omissions d'actions (Figure 4.3), la tablette transforme intégralement les interactions en passant d'une approche réaliste à une approche non réaliste. En effet, le fait qu'un document s'imprime depuis la tablette n'est pas réaliste, néanmoins, cela évite à l'apprenant d'effectuer des déplacements superflus. L'étape d'impression reste présente dans le déroulé de l'activité, mais grâce à la tablette, elle est exécutée plus rapidement sans avoir à quitter la zone d'activité. De plus, en cas d'erreurs, l'apprenant ne perd pas du temps en navigation, il peut recommencer l'action sur la tablette virtuelle sans quitter la zone d'activité. Par exemple, dans une activité de préparation de commande, l'élève n'est pas en virtuel pour faire de la logistique, mais pour travailler des compétences précises et la procédure de préparation de commande. La tablette virtuelle nous aide donc à focaliser plus précisément l'apprenant sur des actions plus pertinentes pour l'apprentissage visé, grâce à la diminution de l'importance des interactions à plus faible valeur pédagogique.

l'activité pédagogique (Perrenoud, 1995b). La tablette virtuelle permet à l'utilisateur d'avoir accès aux consignes sous différentes formes pour convenir à différents profils d'élèves. Cette modalité d'interaction est donc propice pour être également un support aux consignes et instructions.

Cependant, s'intéresser au moyen et à l'instant de consultation peut ne pas suffire. Les élèves ne sont pas égaux en ce qui concerne les capacités de lectures. Certains sont capables de lire un paragraphe de consignes et de comprendre instantanément les objectifs du scénario virtuel. D'autres vont avoir plus de difficultés à lire et comprendre la consigne. Par ailleurs, d'après les enseignants, les élèves se contentent parfois de parcourir la consigne sans prendre réellement le temps de comprendre les objectifs. La lecture en diagonale des consignes mène à des situations d'incompréhension de l'élève comme le fait d'être bloqué à une étape précise ou encore ne pas savoir ce qu'il faut faire dans le monde virtuel. En situation actuelle d'apprentissage, les enseignants font face aux mêmes problématiques, où la remarque « *Est-ce que tu as lu les consignes ?* » revient régulièrement.

Dans le cas d'un scénario guidé, ne pas lire les instructions n'est pas un problème bloquant dans le sens où les instructions et les guides virtuels viennent aider l'apprenant dans la réalisation du scénario. En revanche, dans le cas d'un scénario pédagogique où l'utilisateur est « libre » d'effectuer toutes les actions qu'il souhaite, alors ne pas lire les consignes peut être la source de nombreuses difficultés. Nous avons choisi avec les inspecteurs académiques et les enseignants de classer les élèves selon trois niveaux de difficulté. De ce fait, nous proposons une modalité de consignes adaptée à chaque niveau d'apprenant (Figure 4.30). Pour les utilisateurs avancés, la consigne proposée est sous forme d'instruction générale. Il s'agit d'un paragraphe expliquant l'activité ainsi que le contexte de cette dernière (Figure 4.31c). Le niveau intermédiaire découpe les consignes en catégories d'actions à cocher (Figure 4.31b). Il s'agit de conseiller un type d'actions sans dire précisément quoi faire. Puis pour le niveau novice, les consignes sont détaillées sous forme d'actions à cocher, indiquant précisément à l'apprenant quoi faire dans le monde virtuel (Figure 4.31a). La complexité de cette approche réside en partie dans la détermination du profil du niveau de l'apprenant, c'est pourquoi nous préférons laisser le choix aux enseignants de déterminer la modalité de consignes à utiliser pour chaque apprenant. Cette approche

est détaillée dans le prochain chapitre avec notre proposition de variables didactiques (sous-section 5.2.2).

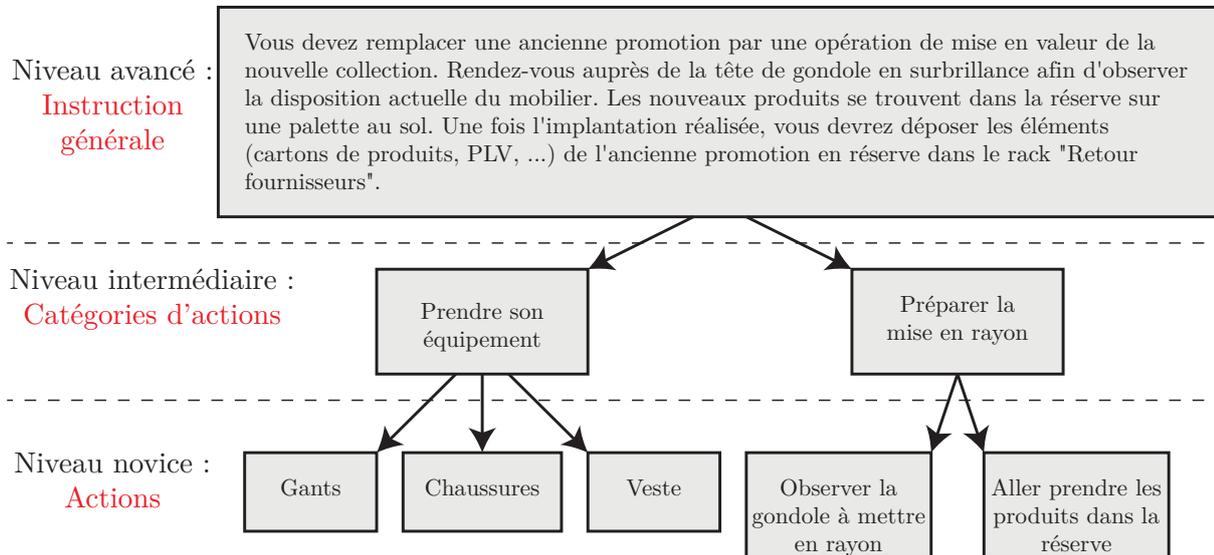


FIGURE 4.30 – Représentation des différents niveaux de consignes pour une activité de mise en rayon. Les catégories et actions ont été simplifiées pour plus de clarté.

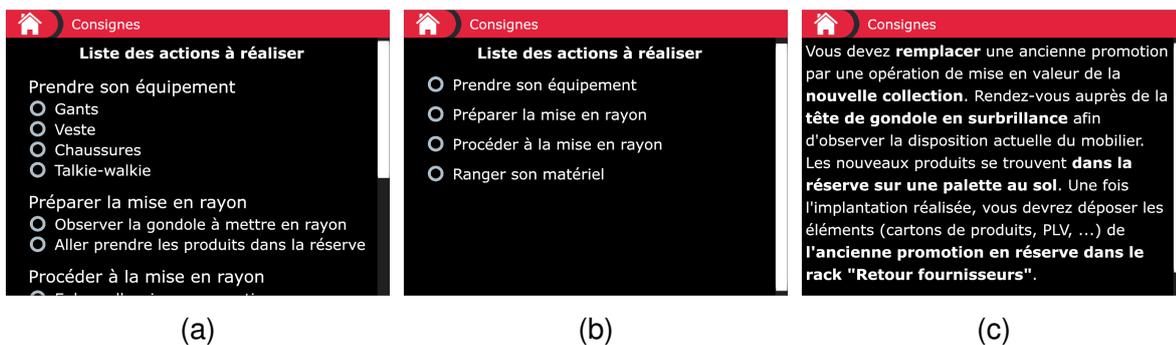


FIGURE 4.31 – Affichage d'une consigne sur la tablette virtuelle suivant les trois niveaux d'apprenants novice, intermédiaire, avancé.

La méthode d'écriture et la métaphore d'affichage sont importantes, mais l'autre constat effectué sur le terrain est élèves ont tendance à oublier les consignes, surtout lorsque les apprenants découvrent la situation pédagogique virtuelle. Cela est d'autant plus visible lors de l'utilisation d'une consigne non adaptée au niveau de l'élève,

comme un paragraphe instructif pour un novice. L'oubli de la consigne a pour effet de créer des moments de doutes et d'errance pour l'apprenant. Le référent pédagogique, s'il est présent, est donc obligé de rappeler les consignes. Il faut donc donner la possibilité à l'apprenant de contrôler son accès aux consignes, et cet accès se doit d'être simple et rapide. La tablette virtuelle est un bon moyen en raison de son accessibilité permanente. De plus, cette approche n'est pas si éloignée de certains métiers, qui utilisent les supports numériques pour indiquer les actions à mener, ou donner des informations techniques telles que des plans ou d'autres documents.

L'utilisation de la tablette comme support aux consignes permet dans un premier temps de mutualiser les développements, et dans un second temps, cela nous donne des informations supplémentaires sur le déroulé de l'activité pédagogique. Nous pouvons savoir le nombre de fois où l'élève a accédé à la consigne, le temps pendant lequel la consigne a été affichée sur la tablette ou encore dans le cas d'un novice ou niveau intermédiaire, la liste d'éléments de consigne cochés sur la tablette. Ces données sont d'un point de vue pédagogique, car elles permettent de dessiner un premier profil pédagogique de l'élève.

4.3.3 Guidance de l'apprenant

La tablette virtuelle est un outil d'accompagnement pertinent donnant l'accès à des interactions 3D simplifiées et à portée de main de l'apprenant. Néanmoins il faut une modalité supplémentaire pour guider un apprenant novice dans la réalisation d'un scénario virtuel pédagogique, en plus de l'assistance à l'utilisation du dispositif et des interactions prodiguées par la tablette virtuelle. Sans guidance, un utilisateur qui manipule l'application virtuelle pour la première fois peut rencontrer certains problèmes et cela peut influencer la performance pédagogique :

- Mauvaise connaissance de l'EV. Cela peut induire des situations d'errance et donc mener à une perte de temps dans l'EV.
- Manque de maîtrise des contrôleurs. L'utilisateur peut avoir du mal à effectuer les interactions, ce qui peut encore une fois ralentir la progression dans le scé-

nario pédagogique, de même qu'introduire des erreurs de la part de l'apprenant.

- Difficultés pour se concentrer à la fois sur l'utilisation des interactions et le contenu pédagogique.

La consigne en elle-même ne suffit pas, car il s'agit d'éléments instructifs donnant à l'apprenant les objectifs ainsi que la finalité de l'activité. Elle n'explique pas comment utiliser l'outil, ou encore comment interagir avec l'EV ou la tablette virtuelle. La première solution consiste à avoir un référent humain à proximité de l'apprenant, qui va pouvoir le guider en donnant des instructions à l'oral. Cette modalité est intéressante si l'on souhaite mobiliser des compétences de restitution des savoirs, pour un élève qui serait en posture d'assistant vis-à-vis de son camarade en immersion. Cependant, le point de départ à tout ce processus est l'enseignant. À la mise en place d'une solution immersive dans un établissement, l'équipe pédagogique est la seule formée à l'utilisation du matériel et des activités pédagogiques virtuelles. Lors des premiers usages de l'outil avec les élèves, seul l'enseignant connaît le matériel et les activités pédagogiques. Par conséquent les premiers apprenants qui vont utiliser l'outil peuvent dépendre des instructions de l'enseignant. Avec le temps, d'autres élèves pourront éventuellement endosser ce rôle, après une ou plusieurs utilisations de l'outil. Comme nous l'avons également exprimé dans les chapitres précédents, gérer en parallèle la classe réelle et des élèves utilisant la RV est très difficile pour les enseignants, ce qui rend ce premier temps d'échange des savoirs compliqué à mettre en place.

Nous proposons ici un module de tutorat automatisé, appelé *ActivityTracker*. Il permet l'établissement de séquences de tutoriels, gérées par l'application pendant la situation pédagogique. Nous définissons le terme « tutoriel » comme étant une situation virtuelle permettant d'assister l'apprenant dans l'utilisation de l'EVAH ainsi que dans la réalisation de l'activité pédagogique. Chaque tutoriel est unique et basé sur une activité virtuelle précise. L'intérêt de l'automatisation réside dans le fait que le système s'occupe d'observer et d'évaluer l'apprenant. Cependant, il n'existe pas de réponse unique, il est pertinent de prendre en compte le contexte et le raisonnement de l'élève. L'apprenant peut choisir une approche qui peut être considérée comme fautive par le système, mais qui, après un débriefing et des explications, s'avère finalement justifiée et correcte. Pour le tutoriel, c'est la même chose, nous souhaitons que ce soit

l'apprenant qui ait la main sur le déroulé du tutoriel. C'est pourquoi nous choisissons une approche contrôlée par l'apprenant et non intégralement autonome. Cela pour plusieurs raisons :

- Cela permet à l'apprenant d'être conscient que l'étape actuelle de l'activité pédagogique est terminée.
- Cela permet d'éviter des « faux positifs », notamment liés aux *miss clics* et aux actions réalisées trop vite ou par « accident ».
- Le rythme du tutoriel évolue en fonction du rythme de l'apprenant. La cadence n'est pas imposée, ce qui réduit le sentiment d'autorité, dicté par le système.
- Pour le concepteur, cette approche simplifie la programmation des étapes, car elles sont manuellement validées par l'apprenant, et non automatiquement par le système.
- Il est possible de savoir à quel instant l'utilisateur a validé une étape du tutoriel ainsi que de confronter cette donnée à l'état de la scène. Cela peut venir enrichir les traces pour la conduite d'un débriefing.
- Si une étape se valide automatiquement, l'apprenant peut ne pas comprendre pourquoi et donc passer à côté d'éléments pédagogiques qui lui étaient potentiellement problématiques.

Le module *ActivityTracker* est découpé, comme les autres en différentes fonctionnalités (Figure 4.32). Ce système repose fortement sur l'approche générique et le polymorphisme, et seulement trois scripts de base sont utilisés :

- *TrackerStep* : Il s'agit d'une étape précise du tutoriel, comme « Ouvrir une porte » ou « Poser un objet sur une surface précise ».
- *TrackerStepSettings* : Une étape peut comporter des paramètres spécifiques, et pour éviter de dupliquer des étapes, il est possible de spécifier plusieurs pa-

ramètres pour une seule et même étape.

- *TrackerSequence* : Il s'agit d'une séquence tutoriel, elle est composée de plusieurs étapes.

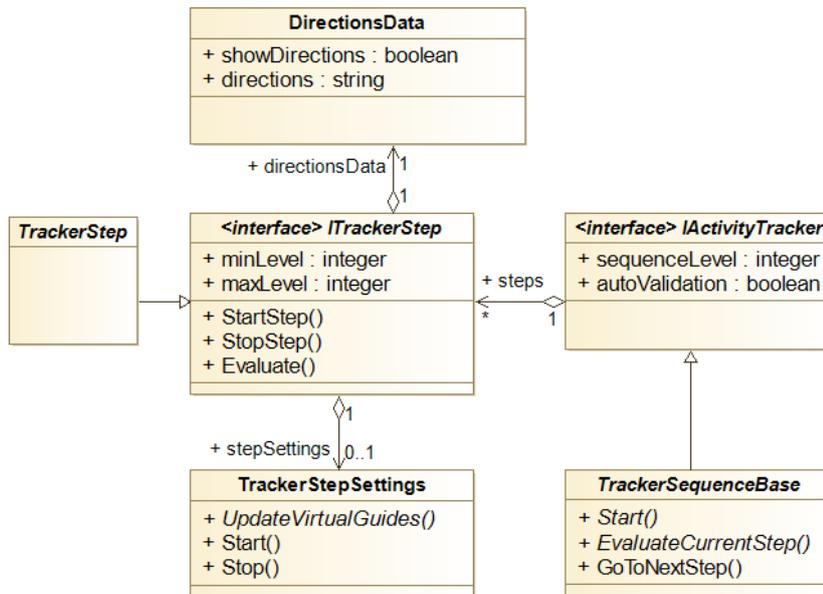


FIGURE 4.32 – Diagramme de classe simplifié du module *ActivityTracker*. Chaque tutoriel est composé de plusieurs étapes. Ces dernières peuvent être modulées par des paramètres spécifiques (*TrackerStepSettings*).

Une séquence est donc constituée d'une succession d'étapes, que l'utilisateur doit réaliser dans un ordre précis. Chaque étape est affichée sur la tablette virtuelle, grâce à une prompt qui affiche des informations à propos de l'étape en cours (Figure 4.33). Une explication textuelle ou sonore peut ne pas suffire pour guider efficacement l'apprenant dans un EV inconnu. Nous avons donc aussi rajouté des guides virtuels passifs qui servent par exemple à indiquer le chemin à parcourir ou encore les éléments interactifs sur lesquels l'utilisateur doit agir pendant cette étape. Ces éléments additionnels, bien que non réalistes, constituent une aide importante pour l'apprenant, mais nous devons nuancer cela en précisant que la présence même de ces aides peut nuire à la performance pédagogique. En effet, il est nécessaire dans les instructions du module, en plus d'expliquer « comment » faire l'action d'un point de vue opérationnel,

indiquer « pourquoi » l'apprenant doit faire cette étape précise, quel est son but et sa finalité. Sans ces éléments de contexte, l'élève a juste à suivre les guides virtuels pour terminer l'activité sans trop se poser de questions. La complexité de la guidance dans un EVAH réside donc dans le contenu des instructions et assistances. Le concepteur doit trouver le juste milieu entre l'accompagnement et l'autonomie de l'apprenant.



FIGURE 4.33 – Utilisation du tutoriel en situation virtuelle avec l'utilisation de guides virtuels pour indiquer la destination et les objets sur lesquels agir.

Grâce à l'application de l'approche générique aux scripts de ce module, un concepteur peut de créer de nouvelles séquences sans avoir à recréer toute la logique sous-jacente du module (ex. : évaluation des étapes, stockage de la séquence, gestion des niveaux). Le script *TrackerSequenceBase* gère donc l'évaluation de toutes les étapes ainsi que le dialogue avec la tablette et le système d'activité (section 5.2). Une étape, *TrackerStep*, est un élément de programmation réservé aux comportements spécifiques, comme l'étape « *Ouvrir une porte* » ou encore « *Prendre un objet en main* ». De manière générale, une étape est composée de différents éléments, certains sont destinés à l'utilisateur comme l'intitulé de l'étape, le texte explicatif ou une bande sonore pour les apprenants qui préfèrent des instructions orales. Les validations étant manuelles, il faut que l'élève soit attentif et pense à valider les étapes. Des retours visuels et sonores ont donc été ajoutés afin d'indiquer à l'apprenant lorsqu'un événement survient dans le tutoriel.

Nous intégrons dans notre proposition la considération du niveau de l'apprenant.

Ce dernier permet d'utiliser une même séquence pour plusieurs niveaux de difficulté différents, cela permet d'éviter des doublons et prodigue une meilleure flexibilité pour l'enseignant, mais également l'apprenant (Figure 4.34). Une étape pour un novice peut donc être omise dans le cas où un utilisateur avancé utilise le tutoriel. Par exemple, « *Ouvrir une porte* » n'est pas une étape pertinente pour un apprenant avancé, car ce niveau sous-entend une bonne maîtrise de l'outil virtuel ainsi que de l'EV, alors que pour un novice qui découvre la RV, cette étape évite une situation de blocage dans le monde virtuel. Cette approche est pertinente, car elle autorise un degré de profondeur plus ou moins important pour l'explication d'une tâche pédagogique. Garder l'utilisateur en situation de *flow* est important, car une situation trop simple peut mener à l'ennui de l'élève et une situation trop complexe, mener à la frustration.

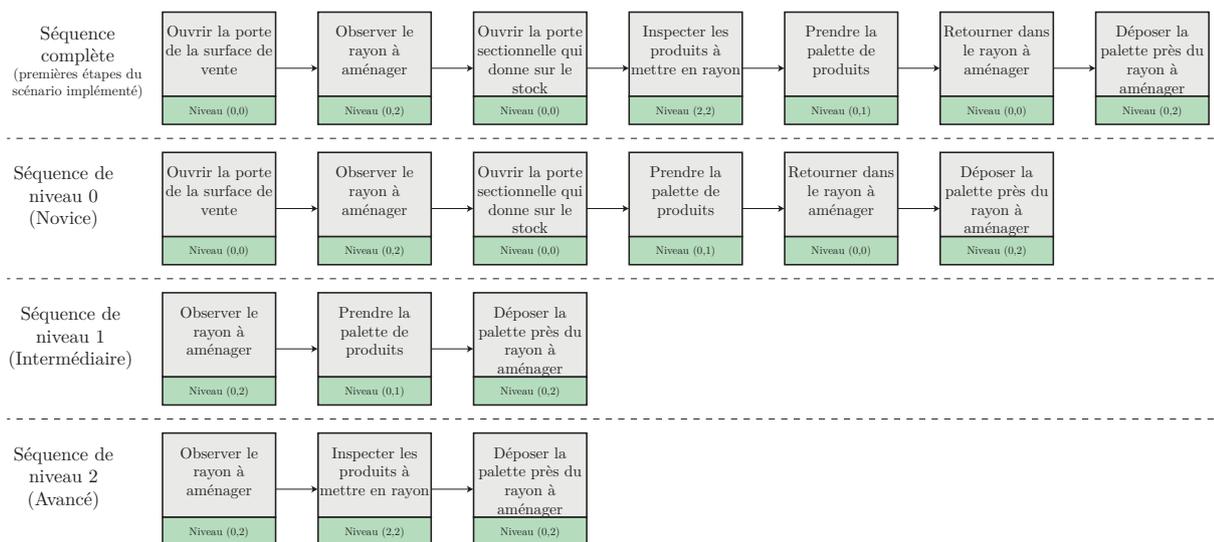


FIGURE 4.34 – Exemple de séquence pour plusieurs niveaux d'apprenants. Le niveau avancé comporte une étape unique, qui demande à l'apprenant d'effectuer une vérification des produits avant de commencer la mise en rayon (vérification des références). En mode avancé, des aléas peuvent être introduits dans les produits.

L'apprenant valide les étapes directement sur la tablette lorsqu'il pense avoir terminé une étape (Figure 4.33). Cependant, dans certains cas, une validation automatique est possible. En effet, bien qu'il existe plusieurs cheminements possibles en formation professionnelle, des situations « préférées » peuvent exister, il s'agit du cas communément appelé « cas idéal », où l'étape a été réalisée dans les règles de l'art

suivant une procédure normalisée. Cette validation automatique est effectuée à partir des observations de l'EV et du contexte pour déterminer si oui ou non l'étape est bien réalisée. Par exemple, valider une étape « *Prendre un objet* » est assez simple, car il n'y a qu'une seule possibilité pour déterminer si l'utilisateur a effectivement pris l'objet demandé. En revanche, le système peut observer l'étape « *Poser la palette à proximité du rayon* » mais la validation peut parfois évoluer en fonction de l'enseignant, des actions de l'utilisateur ou du contexte posé dans la consigne. Alors que pour le système, la distance entre la palette et le rayon se trouve à une distance correcte (Figure 4.35). Dans ce genre de cas, il est préférable de considérer la validation automatique comme étant un indicateur et non une condition pour passer à l'étape suivante.

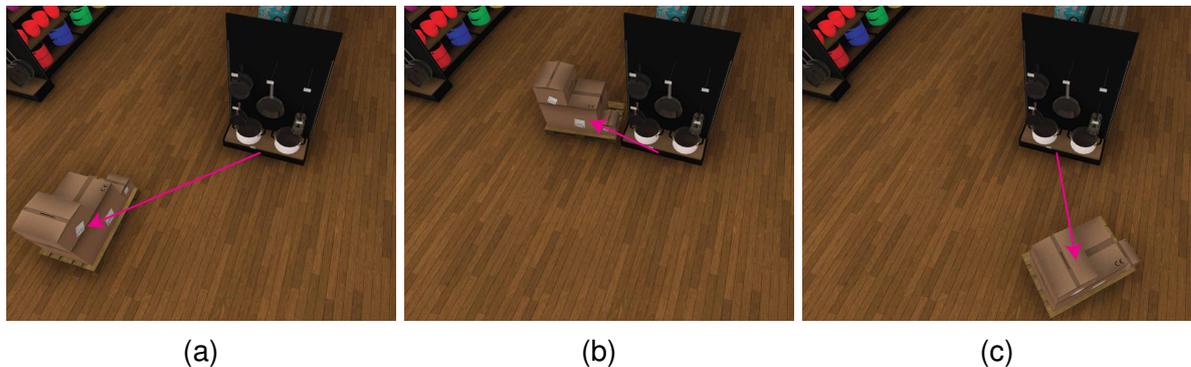


FIGURE 4.35 – Différents cas de placement de palettes considérés corrects par le module car la distance entre la gondole et la palette est jugée acceptable.

À la fin d'une activité comportant une séquence tutoriel, l'application exporte un fichier JSON comportant toutes les étapes ainsi que des données supplémentaires à propos de la performance de l'élève (en annexe listing 1). Les données temporelles à propos de la validation automatique sont pertinentes, car cela permet de voir quand le système a déterminé que l'étape était terminée et quand l'élève a validé cette dernière. Bien entendu, une différence de l'ordre de quelques secondes est tout à fait normale, mais lors d'une différence de l'ordre d'une ou plusieurs minutes, alors cela peut être pertinent pour l'enseignant de s'intéresser plus précisément à cette étape, lors d'un dialogue avec l'élève.

Pour le concepteur, la mise en place de ce module est longue et complexe, du fait de la grande quantité d'étapes à mobiliser en fonction du scénario pédagogique. Ce-

pendant, l'approche générique prend tout son sens ici, car une étape du tutoriel peut être réutilisée telle quelle dans un autre contexte. De plus, nous proposons un système de *TrackerSettings*, qui permet de donner à une étape, plusieurs paramètres. L'intérêt est d'alléger la charge de code à faire pour créer un nouveau comportement. Avec cette approche, le concepteur peut utiliser le script que nous appelons *GenericStep*, qui exploite les conditions de validation d'un script de paramètres *TrackerSettings*, ce qui permet plus de flexibilité. Une approche non générique aurait été de programmer directement le comportement du tutoriel en dur dans le code de l'activité. Cependant, si un élément de l'activité change, alors il faut peut-être reprogrammer le tutoriel, ce qui rend l'ensemble difficilement maintenable par le concepteur. Seuls des changements dans la logique d'une activité comme lors de la mise en place d'un nouveau référentiel peuvent obliger le concepteur à éditer significativement un tutoriel. Le module de tutoriel a été utilisé dans un scénario pédagogique, destiné au Bac Pro Commerce, et pour mettre en place nos éléments propres à l'application, nous avons juste eu à mettre en place des paramètres « *ActivityTrackerSettings* ».

4.4 Synthèse

Ce chapitre porte sur les éléments conceptuels fondamentaux permettant la création d'une base solide pour la conception et le développement de scénario pédagogique en réalité virtuelle pour la formation professionnelle. La partie pédagogique doit, pour fonctionner efficacement, être accompagnée de modules spécifiques qui vont venir assister l'utilisateur à faire des actions simples dans l'EV. L'objectif des briques génériques est donc de simplifier au maximum certaines tâches pour l'apprenant de manière à laisser plus d'espace à la partie pédagogique du scénario. Cette simplification est également applicable aux concepteurs, qui disposent d'éléments conceptuels transposables sans modification dans une autre application pédagogique. L'étayage est une étape importante qu'il ne faut pas négliger. La difficulté de cette dernière est de faire en sorte de garder la logique des actions intactes tout en simplifiant des sous-procédures qui ont peu d'intérêt pédagogique en virtuel.

L'approche générique est aussi pensée pour le concepteur, qui grâce à un découpage réfléchi du code peut manipuler à sa guise les briques génériques en fonction

du contexte pédagogique. Pour une utilisation pédagogique de la RV, les contraintes pour développer des interactions 3D ne sont pas uniquement à propos de l'implémentation informatique. Il est également pertinent de prendre en compte les évolutions des dispositifs de RV, de même que les comportements et connaissances des apprenants visés. En effet, pour qu'une interaction soit appropriée pour les apprenants, il est préférable de considérer le degré de connaissance de ces derniers vis-à-vis de la tâche. Afin de mettre en place un processus d'étayage pertinent et justifié pour l'activité pédagogique. Enfin, le concepteur doit garder à l'esprit que les apprenants peuvent parfois essayer d'utiliser la situation virtuelle à des fins ludiques et non pédagogiques.

La tablette virtuelle, que nous proposons est un bon exemple d'étayage. En effet, des actions coûteuses en temps comme la navigation sont simplifiées grâce à la tablette, comme la possibilité à l'apprenant de faire apparaître un objet en cliquant sur la tablette au lieu de naviguer vers des espaces de stockages dédiés. Le gain de temps de ces actions simplifiées permet d'adapter plus efficacement l'utilisation de la RV à des contextes réels, où les élèves utiliseront de manière ponctuelle cette technologie. C'est aussi un moyen utilisé pour donner les consignes et autres indications à l'apprenant.

TRANSPOSITION D'UNE ACTIVITÉ RÉELLE EN ACTIVITÉ VIRTUELLE

Les EV appliqués à la formation professionnelle demandent des bases de programmation avancées, comme nous venons de le voir dans le chapitre précédent avec les interactions 3D ou les modules d'accompagnement qui permettent de faciliter l'usage de l'outil virtuel. Nous allons voir dans ce chapitre les méthodologies proposées pour passer d'une activité pédagogique classique à une activité en réalité virtuelle. Il convient dans ce contexte de prendre en compte et mettre en œuvre les processus de simplification et d'étayage décrits dans le chapitre précédent.

L'enseignement professionnel est un domaine qui évolue, où rien n'est figé, c'est pourquoi il est pertinent de proposer des approches flexibles et génériques pour pouvoir modifier aisément l'activité pédagogique. Nous allons détailler dans ce chapitre les deux derniers aspects du modèle d'EV proposé dans le chapitre précédent. Il s'agit du lien, et en particulier de la transposition, entre une activité pédagogique classique vers la simulation virtuelle. Enfin, nous proposons dans ce chapitre des pistes pour l'exploitation pédagogique des traces numériques issues de l'activité virtuelle ainsi que des approches pour la conception de scénarios pédagogiques.

5.1 Processus de transposition

Concevoir une activité pédagogique virtuelle demande plusieurs étapes préparatoires. En effet, comme nous l'avons évoqué dans l'introduction de ce manuscrit, les concepteurs (développeurs et infographistes) ne sont pas forcément experts dans le domaine de la pédagogie et de la didactique professionnelle. Des étapes d'écriture du

scénario pédagogique semblent appropriées avant l'implémentation de l'EV pour permettre une transposition efficace d'une activité réelle en activité virtuelle.

Cette scénarisation constitue le cœur de l'applicatif virtuel. Un scénario pédagogique mal conçu ou peu adapté au public visé peut rendre l'application virtuelle inadaptée sur le terrain. Le scénario pédagogique est donc le pont entre la situation pédagogique réelle et la situation virtuelle.

5.1.1 Positionnement sur les approches de conception

L'écriture d'un scénario pédagogique est une étape qui peut être réalisée de plusieurs manières. Dans la littérature, les modèles formels ayant pour vocation d'assister la conception d'une situation pédagogique sont nombreux (ex. : MoPPLiq (Marne, 2014)). La motivation de ces approches est de simplifier les travaux d'écritures et de l'implémentation qui s'en suit. Cependant, comme le précise Vermeulen (2018)(page 48), « *les modèles trop génériques peinent à faciliter la conception et l'usage de learning games* » et dans le cas de nos travaux de thèse, les approches trop génériques et formelles peuvent se révéler complexes à utiliser sur le terrain avec les enseignants de formation professionnelle. Nous avons isolé deux approches conceptuelles dans la littérature qui se rapprochent de notre cas d'étude et qui peuvent potentiellement être utilisées comme base à l'élaboration d'un EV pour un contexte de formation professionnelle :

1. **Les méthodes DISC**, décrites dans les travaux de thèse de Vermeulen (2018). Il s'agit de modèles pour la conception de LG à étapes, qui sont au confluent des méthodes des cas (Marfisi-Schottman *et al.*, 2013) et de l'approche par jeu de rôles décrite par Mariais (2012). L'auteur qualifie ce type de conception de *Learning Gamebook* reposant sur l'approche par jeu de rôle où l'objectif est de permettre à l'apprenant de *créer sa propre histoire*.
2. **La méthode ScenLRPG**, décrite dans la thèse de Mariais (2012). Il s'agit d'une méthode centrée utilisateur qui vise à concevoir des Learning Role-Playing Games (LRPG), dispositifs de formation ouverts, pouvant être considéré comme des so-

lutions de formation à distance ou reposant sur des LMS.

Bien que ces deux approches soient essentiellement orientées vers des utilisations en lien avec des *LMS*, certains éléments de ces méthodologies peuvent être utilisés pour un contexte de RV appliqué à la formation professionnelle, comme la capitalisation des résultats, qui est également un procédé très répandu dans l'industrie ou encore l'implication directe des clients dans certaines étapes du processus créatif. Dans le cadre de nos travaux, nous pouvons identifier deux niveaux de clients : (1) Tout d'abord, lors de la création d'un nouveau scénario impliquant le processus d'écriture d'une séquence pédagogique décrit dans ce chapitre, les clients peuvent être identifiés comme les enseignants. (2) Dans le cas d'une vente d'une application déjà rédigée et finalisée, les clients peuvent être les DDFPT. Nous allons dessiner progressivement notre approche de conception qui reprend certains éléments de la littérature, mais appliquée à la RV dans un contexte de formation professionnelle.

Ces deux méthodes sont intéressantes, car elles mobilisent l'enseignant, qui est considéré par Vermeulen (2018) comme un enseignant-auteur ou comme le client / commanditaire par Mariais (2012). Dans notre cas d'application, les enseignants doivent également être pris en compte dans le processus de conception, car le concepteur n'est pas expert dans le métier étudié. Le modèle de Vermeulen (2018) mobilise dans ses expérimentations des enseignants du supérieur. En ce qui nous concerne, nous avons travaillé avec des enseignants de la formation professionnelle, avec des implications radicalement différentes. Le contexte hétérogène de la formation professionnelle souligne le fait que plusieurs points de vue pédagogiques peuvent entrer en conflit et que des choix précis doivent être faits. C'est pourquoi le point de vue de plusieurs enseignants peut être requis.

La méthode *DISC* (Vermeulen, 2018) a fait l'objet d'une première implémentation sous forme de MOOC portant sur les statistiques pour des étudiants en Licence 3 (L3), puis dans une seconde itération du modèle, une implémentation de *LG* portant sur de la résolution de problèmes liés à la mécanique des fluides. Ces deux exemples sont des situations de résolutions de problèmes et ces approches peuvent être différentes des situations rencontrées dans l'enseignement professionnel, dans le sens où une activité peut ne pas comporter de problème en particulier, mais doit respecter des règles

précises tant sur la pertinence des actions que sur les liens avec un référentiel. Ou alors cela peut être la mise en place d'une activité emblématique d'un métier précis comme la mise en rayon ou le changement de format sur une machine industrielle. L'approche *ScenLRPG* (Mariais, 2012) suggère plus de libertés de création grâce à une approche qui se rapproche des méthodes de créativité, notamment grâce son implémentation (logiciel ou cartes à jouer) où le concepteur doit définir les ressorts du jeu.

Dans certains cas, une seule façon d'agir est possible et d'autres fois plusieurs méthodes sont correctes. Cela soulève ainsi la question des traces gérées par l'application pédagogique. Pour Vermeulen (2018) les traces doivent être évoquées à la suite de l'application du modèle conceptuel avec les enseignants, pour qu'ils puissent faire part de leurs besoins à propos des traces. Pour *ScenLRPG*, les traces ne sont pas directement utilisées et explicitées dans la méthodologie, et elles sont mises en avant sous forme de débriefing, d'échanges ou de questionnaires. Étant donné que cette approche se destine plus aux formations non présentielle et aux LMS, les traces qui en découlent peuvent être limitées aux résultats des questionnaires ou des métadonnées (temps de complétion, bonnes réponses, etc.). Alors que pour *DISC*, l'auteur précise que les traces sont sous forme des fichiers de données ou *logs*. Dans une approche pour la formation professionnelle, les traces ont un tout autre sens. Il ne s'agit pas seulement de données brutes issues de l'application, mais également d'indicateurs servants à l'enseignant lors de l'exploitation pédagogique de ces dernières. Nous distinguons finalement deux niveaux de traces :

- Les **indicateurs de performance directs**. Utilisés a posteriori ou avant la session virtuelle par l'enseignant soit pour effectuer un travail préparatoire, soit pour conduire un entretien d'explicitation.
- Les **données abstraites**. Dans leur forme informatique habituelle (JSON, XML, fichier texte), elles ne sont pas exploitables directement, un processus intermédiaire de transformation est nécessaire pour rendre ces données interprétables par un enseignant. Elles prennent alors tout leur sens lorsqu'elles sont analysées et transformées en informations de plus haut niveau pour aboutir à des indicateurs.

Les approches de Vermeulen (2018) et Mariais (2012) s'accordent aussi sur l'importance du processus de réingénierie. En effet, dans une utilisation orientée terrain et dans un contexte industriel, un processus itératif impliquant de la réingénierie est essentiel afin de pouvoir présenter des situations de conception de plus en plus efficace aux enseignants. La capitalisation des résultats et l'utilisation des développements et des expériences passées est également mis en avant dans l'approche de Mariais (2012), notamment par le biais de bibliothèques de scénarios LRPG ou de documents supports à la conception, qui est dans notre cas, les briques génériques développées au fil du temps.

Concernant l'utilisation concrète des deux modèles *DISC* et *ScenLRPG*, la présence de l'enseignant/client est requise. Dans le premier cas, pour *DISC*, plusieurs livrables ont été créés à l'issue d'un entretien semi-directif (ex. : cartes mentales). Dans le cas de *ScenLRPG*, deux méthodes sont mises en avant dans les travaux de thèse de Mariais (2012), une approche impliquant l'utilisation d'un logiciel auteur et une autre approche qui utilise le format de cartes à jouer. Ces deux méthodes utilisent des rencontres physiques entre les concepteurs et les référents pédagogiques. Les échanges sous forme de réunion ou d'entretien sont préférables aux approches demandant moins de relations humaines telles que les outils auteurs autorisant une conception en autonomie. Cependant pour une utilisation en formation professionnelle, les deux approches de Vermeulen (2018) et Mariais (2012) demandent à être complétées et modifiées par des éléments qui sont propres au contexte de la formation professionnelle :

- Le **référentiel de formation**. Cet élément est primordial pour pouvoir mettre en place une conception de scénario pédagogique en formation professionnelle. Il s'agit d'un document national de référence qui décrit l'ensemble des activités professionnelles, des compétences et de l'évaluation à mettre en place pour un diplôme précis. Il est rédigé par une commission d'experts métiers ainsi que par des référents pédagogiques (ex. : enseignants, formateurs, inspecteurs académiques). Les référentiels sont parfois réformés pour pouvoir adapter l'offre de formation aux réalités des métiers visés. Pour la formation professionnelle, le référentiel le même pour les apprenants de seconde, première et terminale.

- Les **compétences ciblées**. L'explicitation des compétences pour le scénario pédagogique va de pair avec l'élément précédent. Le formalisme des référentiels doit être respecté pour que les enseignants puissent échanger sur des bases communes et cela se fait généralement par une sémantique précise.

- Le **niveau des apprenants**. Dans les approches pour l'enseignement supérieur, cette distinction de niveau n'est pas forcément mise en avant, notamment parce que les scénarios sont créés pour une « classe » en particulier, comme pour une des implémentations de *DISC* qui est prévue pour des L3. Dans notre cas d'étude, en formation professionnelle, plusieurs classes sont à considérer (seconde, première, terminale, CAP, BTS, classes spécialisées) pour permettre aux apprenants en difficulté de progresser, notamment en proposant un niveau de difficulté adéquat. Cela implique une explicitation des niveaux de chacun lors des étapes de conception pédagogique. Par ailleurs, prendre en compte dès l'écriture du scénario le niveau des apprenants autorise les enseignants et les concepteurs à anticiper les usages de l'outil, comme le précise Mellet D'huart (2004) à propos de la phase de préconception d'un EV.

- Les **indicateurs de performances**. Les traces peuvent être comme le décrit Vermeulen (2018), des fichiers de donnée ou des *logs* (données abstraites). Par ailleurs, les données brutes génériques extraites de l'EV ne peuvent pas constituer un socle solide pour l'évaluation, une transformation doit être appliquée. C'est au moment de la conception du scénario pédagogique qu'il convient de détailler ce que l'on souhaite observer, sous quelle forme, et comment le consigner en fin d'activité. Nous rejoignons Radigois (2018) sur le fait qu'il est important que les enseignants interviennent dans le processus de caractérisation de ces indicateurs de performance, car les enseignants sont ici pleinement dans leurs rôles.

- Les **interactions 3D**. Bien que cet aspect soit décrit dans le modèle *DISC* par la composante *I*, à savoir les interactions, nous suggérons de donner une dimension plus forte à la description de ces dernières. En effet, les interactions décrites dans *DISC* manquent de précision dans leur implémentation et dans

leur utilisation par l'apprenant. Cela est justifié par le fait qu'il s'agit d'une approche pensée entre autres pour les LMS et non pour la RV. Il est donc intéressant que le concepteur donne plus de détails sur l'utilisation concrète d'une interaction spécifique, surtout si l'on considère la présence ou non d'étayage de l'interaction.

5.1.2 Situations de conception de nouvelles activités virtuelles

Dans le cas de l'application à la formation professionnelle, nous pouvons rencontrer plusieurs types de projets qui obligent d'adopter des postures différentes vis-à-vis de la conception en général.

- **Approche exploratoire.** Il s'agit d'un type de projet où le contexte virtuel n'est pas défini précisément. Il s'agit d'étudier la faisabilité de l'utilisation de la RV dans le cas d'un diplôme spécifique. C'est une approche qui débute sans objectif final, c'est-à-dire qu'il est possible que le référentiel ne se prête pas à l'utilisation de la RV ou alors que les activités pédagogiques ne sont pas numérisables. L'utilisation d'une méthode papier similaire à celle décrite dans Mariais (2012) pour *ScenLRPG* peut s'avérer pertinente ici. Les développements passés peuvent être une source importante d'informations, pouvant guider efficacement le processus de réflexion.
- **Réunion de conception pédagogique / Projet académique.** Au cours de ces travaux, nous avons rencontré ce type de projet à plusieurs reprises (ex. : Projet EFFICI@N¹). La finalité de ces réunions de travail est la production d'un scénario pédagogique pour une activité précise d'un référentiel donné. Les approches de conception peuvent être identiques à la catégorie précédemment énumérée, cependant le temps de réflexion y est limité. Par conséquent, la mise en place d'une méthodologie précise y a tout à fait sa place. De plus, l'intervention des éléments capitalisés tels que les briques logicielles ou les développements passés permet d'optimiser ces temps de conception pédagogique, en proposant aux enseignants des situations existantes sur lesquelles baser le processus de

1. <https://greta-paysdelaloire.univ-lyon1.fr>

réflexion.

- **Appel à projets, AO (Appel d'Offres).** Il s'agit d'une approche industrielle classique où le client souhaite l'implémentation d'un scénario pédagogique décrit dans l'appel d'offres. Les éléments sont formalisés suivant la méthode de choix du client, c'est ensuite aux concepteurs de s'adapter et de proposer une réalisation en adéquation avec l'activité décrite. Ce genre de projet peut rapidement devenir complexe, surtout si des éléments du scénario sont manquants ou peu explicites. Ce type de projet a pour vocation de débiter directement par le développement informatique.

5.1.3 Modélisation du processus de conception

La figure 5.1 représente notre proposition de processus global de conception d'une application de RV pour la formation professionnelle. Ce processus a été progressivement conçu au début de ces travaux de thèse, lors de la conception de plusieurs activités pédagogiques. Deux d'entre elles ont abouti à des applications complètes, décrites dans le prochain chapitre (section 6.1). Les méthodologies impliquant des approches techniques complexes telles que de l'UML, ou des formalismes spécifiques n'ont pas fonctionné avec les enseignants de formation professionnelle. Pour certaines approches, cela peut s'expliquer par leur complexité impliquant des connaissances techniques et théoriques conséquentes. Pour d'autres méthodes, par exemple l'approche par outil auteur tels que *LEGADEE* (Marfisi-Schottman, 2012) ou *APPLiq* (Marne, 2014), les enseignants ont jugé ces dernières inadaptées au regard des attentes pédagogiques, et ils ont par la suite, proposé leurs propres approches à partir desquelles nous avons pu élaborer notre modèle. De plus, le temps de maîtrise d'un formalisme précis est à prendre en compte, étant donné que les réunions de travail sont complexes à organiser en raison des contraintes d'agenda de chacun, d'autant plus que les participants (enseignants) peuvent changer d'une réunion à l'autre. Pour créer une situation de formation professionnelle efficace en RV, le concepteur à tout intérêt de considérer l'expérience des enseignants. Sinon la situation virtuelle risque de ne pas être adaptée à la fois pour les enseignants et pour les apprenants. Il est donc judicieux pour le concepteur d'avoir à sa disposition une méthode flexible pour faciliter

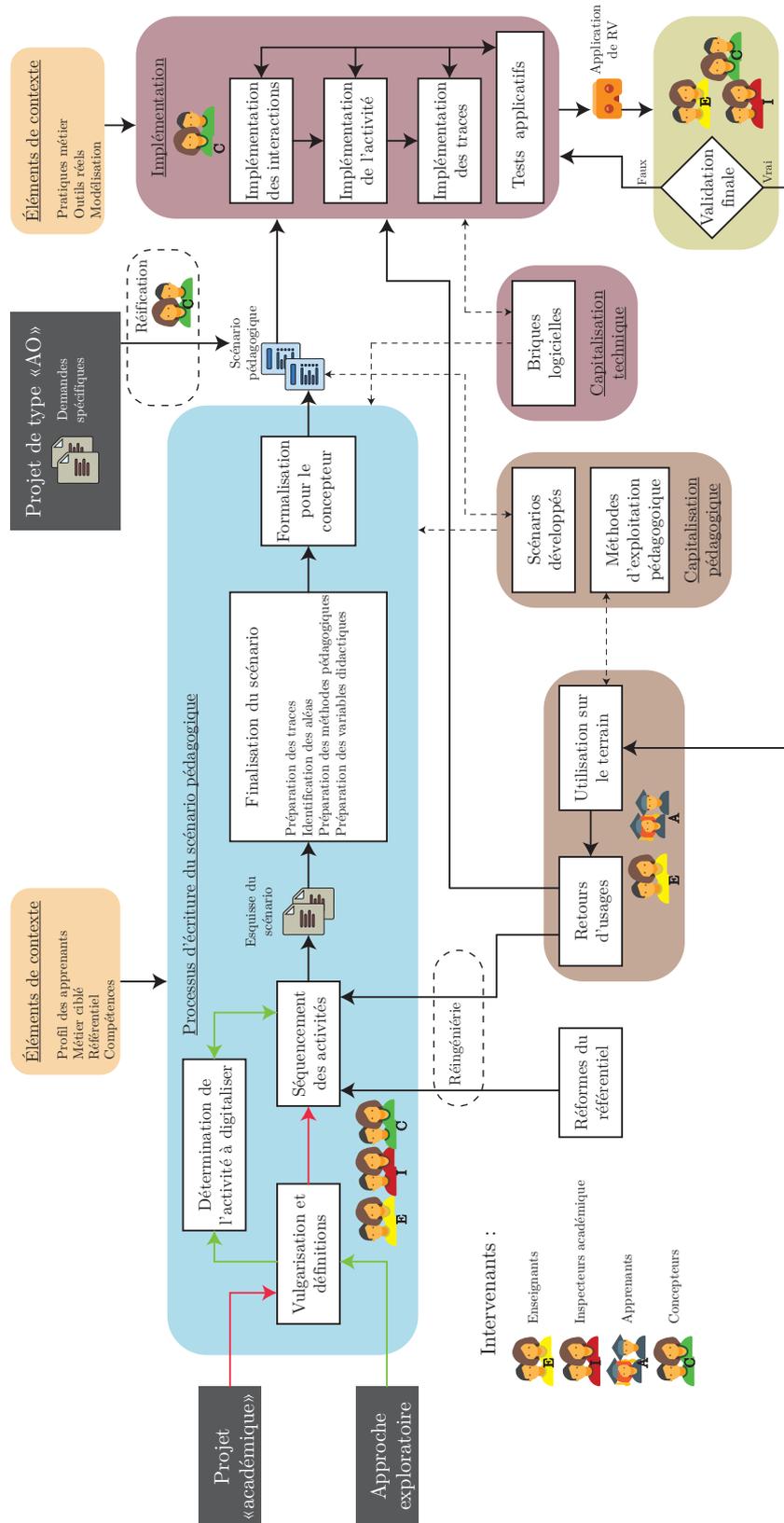


FIGURE 5.1 – Processus de conception d'une application de RV appliquée à la formation professionnelle.

les échanges et le processus créatif entre tous les protagonistes, à savoir les référents pédagogiques (enseignants, inspecteurs académiques), le concepteur et si cela est possible, les professionnels des métiers concernés. Le modèle que nous suggérons s'est donc construit progressivement en prenant en compte l'avis des enseignants et en suivant une approche industrielle se rapprochant du « cycle en V » ou encore une approche en trois étapes décrites par Mellet D'huart (2004) (préconception, conception, postconception). Nous pouvons décrire succinctement les étapes principales de ce modèle :

- **Vulgarisation et définitions** : Dans le cas de l'approche exploratoire ou de la réunion académique, nous proposons en préambule de la conception pédagogique, un premier temps d'échange entre les différents référents pédagogiques et les concepteurs. Ce temps d'échange se déroule sous forme d'une réunion. Toutes les étapes de la partie de conception de l'activité sont à réaliser en présentiel. Nous recommandons les échanges réels par rapport au travail à distance asynchrone. Il y a des différences notables entre les connaissances des uns et des autres, il est approprié d'harmoniser les termes et définitions à employer. Cette étape d'explicitation des termes peut s'accompagner d'une étape dite de vulgarisation à propos des compétences et connaissances de chacun, de même qu'une introduction de la méthode employée pour concevoir, implémenter et utiliser la RV en contexte de formation professionnelle. La vulgarisation pour le concepteur consiste à expliquer les finalités de la RV appliquée à la formation professionnelle, de même que les interactions 3D possibles pour l'apprenant et l'enseignant. Ces explications d'interactions 3D peuvent s'accompagner de démonstrations à l'aide d'éléments capitalisés issus des développements passés. Pour les enseignants, la vulgarisation consiste en une explicitation des pratiques pédagogiques avec les apprenants, ainsi que des explications sur le métier ciblé par le processus d'écriture de la séquence pédagogique. La réalisation des activités pédagogiques sur le plateau technique et en situation professionnelle est également explicitée. En effet il peut exister des différences entre la situation en condition de formation et dans le monde professionnel, il est donc pertinent de considérer ces différences afin de préparer des activités pédagogiques virtuelles en adéquation avec les enseignements. L'étayage ainsi que le principe du développement générique doivent être expliqués claire-

ment par le concepteur pour orienter dès le début la réflexion des enseignants. Cette étape permet de mettre en place une base commune sur laquelle échanger et peut éviter certains malentendus qui pourraient faire perdre du temps de conception pédagogique.

- **Détermination des activités à digitaliser** : Pour l'approche exploratoire, les activités réelles à mettre en place dans le monde virtuel ne sont pas clairement identifiées. Cette étape consiste à utiliser les éléments de contextes et les expériences des enseignants pour isoler les activités potentiellement candidates au processus de digitalisation. Par ailleurs, il est possible dans une situation exploratoire de revenir à cette étape, même lorsque le séquençement a commencé, étant donné la nature même de cette approche itérative. Pour initier les échanges lors de cette étape, plusieurs remarques types peuvent aider à lancer la réflexion pour trouver des activités éligibles à la digitalisation :
 - Demander aux enseignants quelles sont les activités pédagogiques difficilement réalisables dans les établissements, mais qui sont nécessaires selon le référentiel/métier ciblé.
 - Isoler une activité emblématique du métier.
 - Isoler des activités qui peuvent se montrer intéressantes en RV, notamment grâce au niveau de détails et aux fonctionnalités que la RV peut prodiguer.
 - Demander aux enseignants quelles sont les activités qui demandent le plus d'adaptabilité en fonction du niveau de l'apprenant.
 - Prendre une approche plus naïve en demandant quelle activité serait « pertinente » en virtuel. Les réponses spontanées peuvent parfois être un bon point de départ à la réflexion.
- **Séquencement d'activité** : Il s'agit de l'étape où l'activité professionnelle est discutée et segmentée en étapes clefs. Ce processus fait intervenir les éléments de contextes, mais également les éléments issus de la capitalisation des

développements passés. La mobilisation de l'existant permet de mieux définir les développements spécifiques à venir et évite la mise en place d'interactions similaires donnant lieu à des doublons informatiques. Le séquençement est également le point de départ des nouveaux cycles de réingénierie, notamment à la suite d'une réforme pour le diplôme ciblé, ou alors à la suite de retours d'utilisation suggérant une mise à jour où l'implémentation d'une nouvelle activité. Cette étape donne lieu à des livrables intermédiaires, utiles lors des prochaines sessions de travail. Il est judicieux de consigner le séquençement de l'activité, car les groupes de travail, surtout dans les projets académiques, peuvent changer d'une session à l'autre. Par conséquent il est approprié de garder des traces intermédiaires. Le formalisme de ces dernières ne doit pas nécessairement être imposé par le concepteur, dans le sens où cette étape de séquençement itérative concerne principalement les enseignants. La consignation des résultats intermédiaires de ce processus créatif peut donc utiliser les méthodes habituelles des enseignants, laissant donc toute latitude à ces derniers de confronter l'activité virtuelle en cours de conception à leurs pratiques pédagogiques. Les méthodes de travail des enseignants sont généralement communes au sein d'une même filière, par conséquent, en cas de changement d'enseignant dans le groupe de travail, la compréhension de l'état d'avancement pour le nouvel arrivant est simplifiée. Ces méthodes de consignation peuvent être l'utilisation de verbes d'action, des arbres de décisions, ou encore des formalismes plus précis, conçus pour la RV, comme le document d'aide à la conception d'une activité pédagogique mis au point par un enseignant de STI2D de la Sarthe (en annexe, figure A.1). Cet exemple autorise les enseignants à formaliser une activité en mettant en avant les données du référentiel comme les compétences, les attendus ou encore l'utilisation d'une sémantique précise. Dans sa forme actuelle, ce document est peu exploitable par le concepteur, dans le sens où les éléments à implémenter sont peu présents comparativement aux éléments didactiques. En revanche, pour les enseignants, il constitue une base de travail communément compréhensible et très pertinente.

- **La finalisation du scénario** : Il s'agit de la dernière étape de conception pédagogique qui permet de faire un lien plus étroit entre la situation professionnelle, la considération du terrain et l'activité virtuelle. En formation professionnelle il

est intéressant de travailler les situations nominales de même que les situations dégradées comportant des aléas. D'autres éléments sont ici pris en compte comme les profils des apprenants, permettant la mise en place des variables didactiques ou encore la préparation des traces en déterminant comment le système va observer et consigner les actions de l'utilisateur. Cette étape vise donc à prévoir les variations et éléments pédagogiques qui vont permettre une bonne utilisation du scénario pédagogique en classe.

- **Formalisation pour le concepteur** : Il s'agit de la dernière étape du premier cycle de la conception pédagogique. Il vise à préparer tous les éléments propices à la création informatique du scénario pédagogique. L'objectif in fine pour le concepteur est de pouvoir travailler en autonomie à partir des éléments consignés par les enseignants. Le scénario pédagogique et les éléments finalisés sont donc compilés en un document plus général par le concepteur en accord avec les enseignants, de manière à être utilisables par l'ensemble des concepteurs. La forme de ce document dépend du type d'activité. Par exemple, une activité de STI2D, plus procédurale, n'est pas comparable à une situation faisant intervenir des éléments de « créativité » comme une activité de préparation d'animation saisonnière dans un magasin. L'utilisateur dans le second cas possède davantage de libertés d'action et le système peut avoir des difficultés à interpréter les différents cheminements empruntés par les apprenants pour procéder à une évaluation. Alors que dans le premier cas, l'activité est linéaire avec très peu de points de divergences, ce qui peut autoriser une représentation sous forme de graphe. Dans le second cas, cela peut être plus complexe à représenter, c'est pourquoi le principe de *storyboarding* ou des *user stories* peut ici être utile pour le concepteur. Concernant les aléas, ils peuvent être renseignés sous la même forme que l'activité type et être considérés comme des études de cas, à la manière de Vermeulen (2018) où chaque aléa type, peut être indépendant des autres et correspondre à un niveau spécifique de maîtrise, mis en place grâce aux variables didactiques.
- Dans le cas d'un projet où l'activité et le scénario sont imposés, le concepteur doit procéder à une étape de **réification**, lui permettant de traduire les attentes du client en un format concrètement exploitable pour la conception. Cette étape

peut être complexe dans la mesure où le scénario pédagogique imposé peut ne pas être compatible pour la RV. Par exemple cela peut être un projet sur de la gestuelle professionnelle ou encore une activité pédagogique qui mime la réalité dans son déroulé. Dans de tels cas, l'étayage est un processus à considérer plus précisément.

Le processus de création de la séquence pédagogique aboutit donc à des livrables directement exploitables par le concepteur pour passer à l'étape d'implémentation (section 5.2). Cette dernière n'implique pas l'intervention des enseignants, mais seulement des concepteurs et elle peut par ailleurs se dérouler en parallèle de l'écriture du scénario virtuel. Des échanges restent néanmoins possibles notamment pour lever des verrous ou ambiguïtés à propos de certaines pratiques pédagogiques ou professionnelles. Nous avons fait le choix de segmenter le développement en trois parties distinctes :

- **L'implémentation des interactions** : Nous recommandons d'effectuer cette étape en premier, car elle ne demande pas de connaissances précises à propos du scénario pédagogique. C'est-à-dire qu'un concepteur peut commencer à programmer des interactions 3D avant même que l'intégralité du scénario ne soit terminée. Cela peut être fait en envisageant de s'appuyer sur les éléments déjà développés, autorisant la présentation d'un prototype intermédiaire pendant le processus de conception de l'activité pédagogique. Par exemple cette étape peut être la programmation d'un outil « transpalette » permettant de déplacer des palettes pleines. Le comportement de l'outil en question n'est pas dépendant d'une activité en particulier. Cela permet entre autres de proposer un prototype pour statuer par exemple sur son comportement en fonction des règles de sécurité, de même que les moyens d'interactions avec cet outil. De cette manière, les premiers verrous techniques liés aux modalités d'interactions 3D peuvent être levés. Ces prototypes peuvent également permettre de mieux guider le processus de création de l'activité pédagogique. Pour l'outil transpalette, il a par exemple été mis en avant le fait que la manipulation de ce genre d'outil n'est pas forcément vue en seconde, ce qui nous a permis de mieux adapter le scénario virtuel ainsi que les variables didactiques liées (sous-section 5.2.2).

- **Implémentation de l'activité** : Cette étape du développement requiert que le scénario pédagogique ainsi que les éléments annexes (aléas, variables didactiques, etc.) soient rédigés et formalisés pour le concepteur. Cela consiste à utiliser les briques logicielles et les interactions spécifiques développées à l'étape précédente pour mettre en place le déroulé de l'activité.
- **Implémentation des traces** : Il s'agit ici de la dernière étape du développement. Les traces sont directement liées à l'activité pédagogique et reposent pour leur génération sur les briques logicielles, car ces dernières intègrent déjà des fonctionnalités de traçage. Il y a donc deux niveaux de traces : (1) celles qui sont embarquées dans les briques logicielles, et (2) celles qui sont propres à l'activité pédagogique. Pour ce second cas, cela peut être l'observation du respect d'une procédure précise sur une machine industrielle lors d'une maintenance. En cas d'évolution de l'activité, les traces directement liées à l'activité (cas (2)) peuvent être amenées à évoluer et cela peut mettre en péril la stabilité de l'application et la justesse des données pédagogiques, surtout si la réingénierie des activités intervient trop régulièrement. Par exemple l'évolution d'une procédure sur une machine peut demander au concepteur de revoir la gestion des traces liées, pouvant donner une incohérence entre les traces et les consignes si la mise à jour n'est pas implémentée par le concepteur. Une évolution de procédure peut également déclencher des bugs si des cas spécifiques d'usages ne sont pas prévus.

Le résultat du développement est par la suite testé en interne par les concepteurs, puis validé ou non par les enseignants et les inspecteurs académiques impliqués afin de pouvoir mettre en fonctionnement dans les établissements le scénario pédagogique. Comme pour l'étape de vérification présentée dans le modèle *KOMVR* (Górski *et al.*, 2017), les tests peuvent aboutir à une liste de corrections critiques ou non critiques à appliquer à l'application avant une première mise en application auprès des apprenants. Dans le cas d'une validation correcte, les éléments développés viennent alimenter les données de capitalisation, comme les briques logicielles ou encore les méthodes d'assistance pour l'écriture d'une séquence virtuelle lors d'un prochain processus de conception pédagogique. À l'issue des utilisations sur le terrain avec les élèves, il est possible de mettre en place un processus de réingénierie du dévelop-

pement informatique ou du scénario, comme l'ajout d'une activité ou la modification d'une activité existante dans un contexte d'amélioration continue de l'applicatif. Les évolutions majeures des activités virtuelles sont également déclenchées lorsque les diplômés sont réformés, comme nous avons pu le rencontrer pour le diplôme du Bac Pro Commerce.

5.2 Implémentation du scénario pédagogique

Après avoir séquencé des activités pédagogiques, il reste pour le concepteur à implémenter ces activités au sein du monde virtuel (Figure 5.2). Selon notre modèle décrit dans le chapitre précédent, cette étape arrive après l'implémentation des interactions 3D dans le monde virtuel. Programmer l'activité consiste ainsi à créer un enchaînement logique et cohérent entre les différentes interactions 3D.

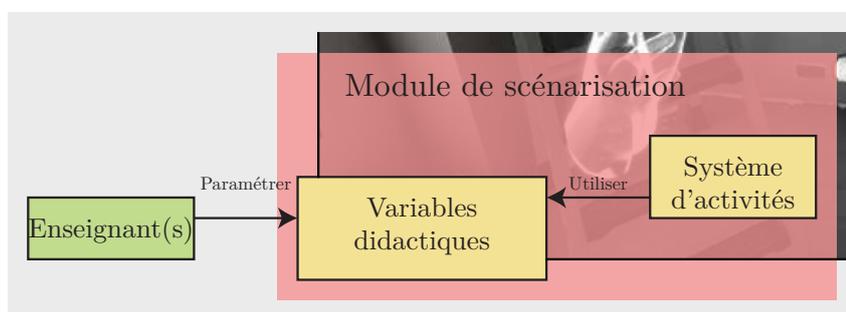


FIGURE 5.2 – Vue d'ensemble schématique des briques logicielles proposées permettant d'implémenter et d'agir sur un scénario pédagogique.

5.2.1 Module de gestion des activités

Pour implémenter une séquence pédagogique, nous recommandons la mise en place d'un module permettant l'homogénéisation de ce processus (Figure 5.3). Il permet d'assister le concepteur dans la démarche de programmation et facilite la maintenabilité. Il repose, comme les autres modules sur une approche générique impliquant

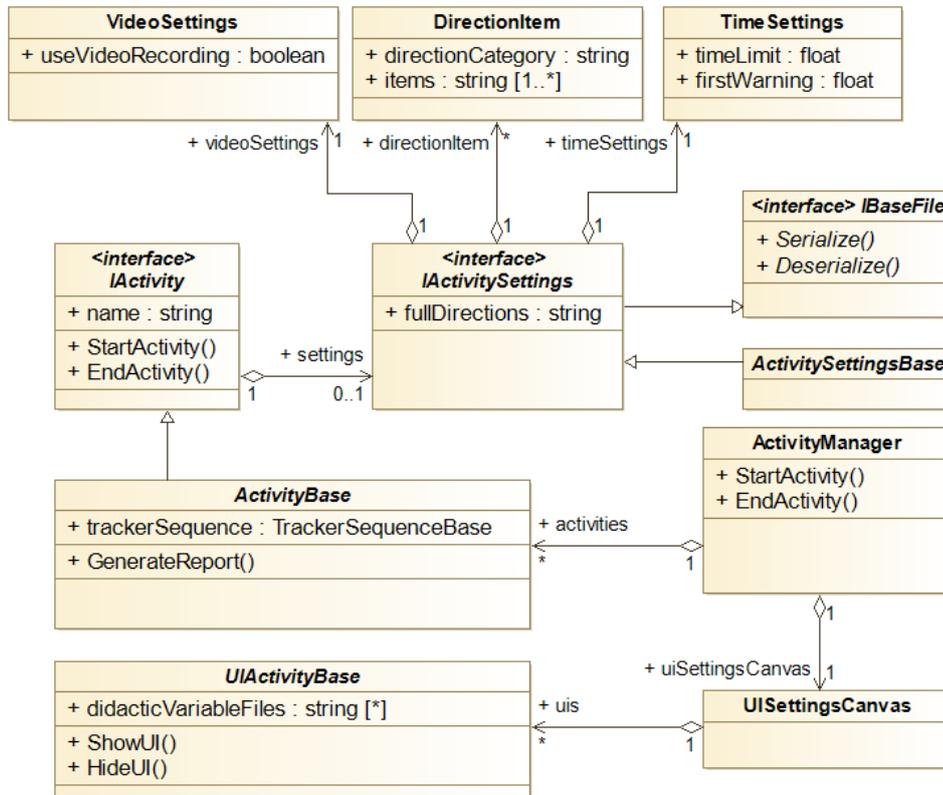


FIGURE 5.3 – Diagramme de classe simplifié du module d'activité.

du polymorphisme et des éléments génériques, favorisant ainsi la démarche industrielle et de réingénierie. Un composant principal, *ActivityManager* gère le lancement des activités, les éléments de variabilité (variables didactiques) et l'évaluation avec la gestion des traces informatiques. Chaque activité est indépendante des autres et elle s'occupe d'observer, de même qu'agir sur des éléments précis de l'EV. Par exemple, un script d'activité qui gère une réception de marchandises va s'occuper d'activer l'avatar du livreur et de préparer automatiquement la palette de produits. Cette gestion centralisée évite donc pour le concepteur de devoir gérer des éléments spécifiques dans chaque objet virtuel, garantissant ainsi une meilleure indépendance des scripts.

Un monde virtuel peut contenir plusieurs activités, il est justifié de mettre en place des techniques permettant au concepteur de faire cohabiter aisément plusieurs situations pédagogiques au sein d'une même application virtuelle. D'un point de vue informatique, une activité est perçue de trois manières distinctes :

- **Un scénario libre.** Les actions dans le monde virtuel ne sont pas restreintes, l'utilisateur est libre de ses actions et de l'ordre dans lequel il les effectue. Cela est notamment pratique lors d'une session d'évaluation ou alors pour voir si l'apprenant est capable de restituer une procédure vue précédemment en classe.
- **Un scénario semi-libre.** Il s'agit d'un scénario où une dépendance existe entre certaines actions dans le monde virtuel. Dans ce cas, une action n'est pas réalisable tant qu'une autre n'a pas été correctement effectuée. Une dépendance d'action liée à la nature même de l'outil en cours d'utilisation. Par exemple, faire un réarmement d'une machine avant la mise en service n'est pas considérée comme une action d'un scénario semi-libre. En revanche, ne pas autoriser l'ouverture d'une porte tant que l'utilisateur n'a pas effectué une action comme valider un élément sur la tablette est une action qui correspond à ce style de scénario. L'utilisateur est donc libre de ses actions, mais certaines sont identifiées comme critiques pour l'activité et sont donc obligatoires. L'apprenant ne peut donc pas passer outre ces étapes critiques, il doit les réaliser sous peine d'être bloqué dans la progression de réalisation de l'activité pédagogique.
- **Un scénario dirigé.** Il s'agit d'un scénario de guidance, l'utilisateur est obligé

de compléter correctement chaque tâche pour aller à la suivante. Ce type de scénario repose essentiellement sur l'utilisation du module *ActivityTracker* vu dans le chapitre précédent.

Chaque type de scénario implique une implémentation différente, notamment dans la programmation des interactions, des traces, ainsi que la progression de l'apprenant dans l'activité pédagogique. Pour le scénario dirigé, le module *ActivityTracker* (sous-section 4.3.3) gère automatiquement l'état des activations des interactions 3D. Cependant pour les deux autres cas, c'est au concepteur de mettre en place cela dans le script de l'activité. Pour une procédure linéaire, une machine à état peut être mise en place de manière à activer les bons composants aux bons moments. Pour une activité libre en revanche, le concepteur doit s'assurer que tous les éléments du monde virtuel soient prêts au démarrage pour garantir une bonne autonomie de l'utilisateur et surtout pour éviter que l'apprenant ne soit bloqué dans sa réalisation.

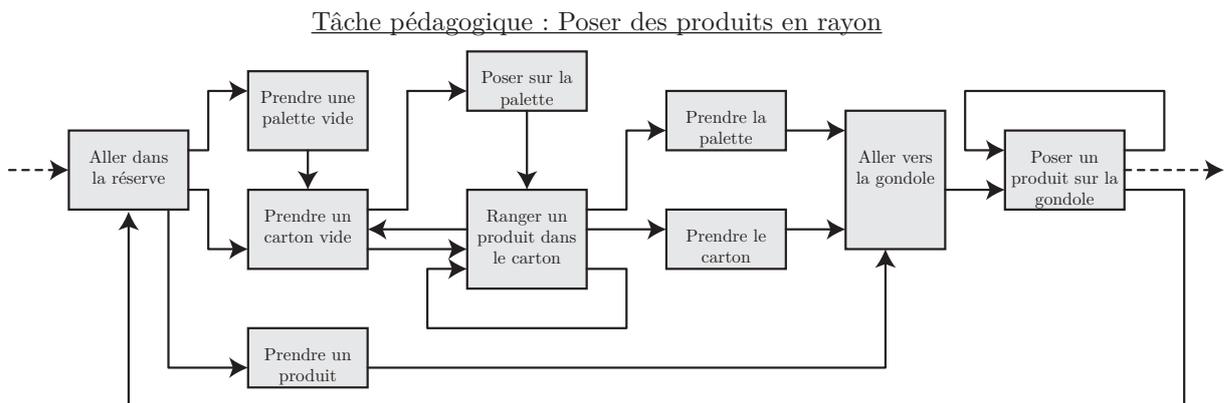


FIGURE 5.4 – Exemple d'activité non linéaire simple où l'apprenant est libre de choisir la façon dont la tâche sera réalisée.

Ce mode libre soulève également une complexité supplémentaire à propos de l'observation des événements du monde virtuel, surtout dans le cas d'une activité non linéaire où plusieurs déroulés sont possibles et corrects. La figure 5.4 illustre un exemple d'activité de mise en rayon pour des apprenants de Bac Pro Commerce. Nous avons implémenté l'activité de manière à permettre à l'apprenant plusieurs approches. La conséquence de cela c'est que l'apprenant peut faire des choix qui sont tous corrects, mais qui possèdent un degré d'optimisation variable. En observant la réalisa-

tion de l'apprenant, le système peut considérer plusieurs approches de « bonnes », alors qu'en réalité il s'agit d'un cheminement non optimum ou pas en accord avec le contexte posé par l'enseignant. Observer le déroulé type peut poser des problèmes d'interprétation, car l'élève peut commencer par une approche non optimisée et terminer par choisir l'approche la plus efficace. Le rôle du système ici est de gérer les traces, de mettre en forme ces dernières et lorsque cela est possible de statuer sur l'état d'une réalisation (correcte, partielle, non conforme). Cette prise de décision n'est pas possible pour toutes les tâches. Par exemple, dans le cas d'une réparation de prise électrique, si l'apprenant répare la prise avant de couper et de consigner le tableau électrique, alors le système est capable de dire que l'étape de consignation n'a pas été réalisée. En revanche, pour déterminer si une mise en rayon est correcte, le système n'est pas capable de se prononcer à ce sujet, car le contexte de l'activité pédagogique peut influencer la manière d'appréhender le résultat de l'activité. Le système peut aller jusqu'à la formalisation d'indicateurs, par exemple dans un rapport d'activité, mais il ne peut pas forcément interpréter ces derniers. C'est alors qu'intervient l'enseignant tuteur qui va pouvoir analyser ces traces pour conduire une évaluation de la performance de l'apprenant. Cette interprétation est fonction du contexte pédagogique donné. Si nous reprenons l'exemple de la mise en rayon, l'enseignant, grâce aux indicateurs renseignés par le système, peut déterminer grâce à l'interprétation des indicateurs de performance, si un apprenant a correctement complété l'activité ou non.

En formation professionnelle les élèves doivent manipuler des procédures précises, mais également dans certains cas être capables de s'adapter au contexte et de suivre une approche plus empirique. Ce cas spécifique d'absence de procédure linéaire précise est très pertinent pour les enseignants d'un point de vue didactique. En revanche, pour le concepteur il est source de complexité, car seul un observateur humain formé au métier est capable de déterminer si les actions de l'utilisateur sont correctes ou non et cela a une influence notable sur la programmation des activités. Cela est intimement lié aux métiers simulés, nous pouvons prendre trois exemples :

- **Métiers du commerce** : Les procédures formalisées sont rares et le contexte des activités change en fonction des magasins. Une mise en rayon ou une préparation de commande ne s'effectue pas de la même manière dans une petite boutique de centre-ville que dans un supermarché alimentaire. De plus, les

politiques de chaque magasin influencent le déroulement des activités, ce qui complexifie également l'écriture d'un scénario « type ». Il est donc tout aussi intéressant d'enseigner des méthodes « générales », de manière à pouvoir travailler des compétences précises, pour ensuite voir comment les apprenants mettent en œuvre ces compétences dans une activité virtuelle spécifique. La complexité de l'implémentation réside dans la mise en place d'une cohérence entre le décor (la modélisation) et les activités pédagogiques. Effectuer une activité dans un grand magasin n'implique pas les mêmes interactions 3D que pour une petite boutique. C'est-à-dire que la grande structure peut posséder une réserve conséquente, et donc comporter des interactions différentes de celles présentes dans une plus petite structure. C'est-à-dire qu'une activité de mise en rayon dans un grand magasin peut impliquer l'utilisation de palettes, de gerbeurs et d'interactions avec les éléments présents dans la réserve. Alors que pour une petite boutique, ces actions ne sont pas forcément réalisables.

- **Le pilotage d'une ligne de production** : Les actions à mener sont généralement fonctions de la machine, mais certaines pratiques sont communes et utilisables quel que soit la situation ou l'entreprise dans laquelle l'apprenant effectue son stage. Par exemple, la gestion des arrêts d'urgence ou les consignes de sécurités pour faire un réarmement d'une machine à outil. Les aléas sont également consignés et l'apprenant doit suivre une procédure pour détecter puis corriger un problème sur la ligne de production. Le concepteur a tout intérêt de reproduire fidèlement le comportement de la machine, de manière à favoriser le pilotage de la ligne par des apprenants qui connaissent déjà les machines. Le virtuel est ici pertinent pour le pilotage de la ligne, et non la compréhension du fonctionnement interne des machines. De ce fait, la programmation de l'activité pédagogique en tant que telle ne possède pas un fort degré de complexité, car les comportements de la machine réelle sont les mêmes qu'en virtuel, ce qui facilite l'exploitation de l'activité pédagogique par les apprenants et les enseignants. La transposition des savoirs du réel au virtuel est également facilitée.
- **Inspection d'un chantier** : Ce type d'activité fait intervenir du suivi de procédure, mais aussi un fort degré d'adaptation, par exemple en raison des facteurs humains qui peuvent être présents comme l'absence d'un ouvrier ou encore

la gestion des retards des autres équipes. Il est juste de prévoir des cheminement différents en fonction des aléas que l'on souhaite mobiliser. Cela doit donc s'effectuer au cœur de l'activité, c'est-à-dire, programmer les comportements directement dans le script de l'activité. Ici, il est également important de mettre en place au moment de la création pédagogique un arbre de décision pour mettre en avant les différents cas possibles en fonction des choix de l'apprenant.

5.2.2 Variables didactiques

L'adaptabilité d'une situation pédagogique est essentielle à la fois pour les apprenants, mais aussi pour les enseignants. Nous avons vu précédemment qu'une activité pédagogique peut comporter des éléments de variabilité ou encore permettre de travailler plusieurs compétences en fonction du contexte d'apprentissage choisi. Nous proposons donc d'introduire dans le module d'activité des éléments permettant de personnaliser des activités pédagogiques virtuelles. Ces éléments sont appelés « *variables didactiques* ». L'enseignant peut préparer des sessions pédagogiques avec des paramètres spécifiques pour chaque activité (Figure 5.5). Ces éléments peuvent être de nature différente. Cela peut être par exemple le fait d'activer ou non une fonctionnalité, ou encore le choix du degré de profondeur d'une interaction spécifique. La gestion des aléas est aussi une variable didactique dans le sens où la présence d'un aléa complexifie ou non la tâche pédagogique. Contrairement à la simplification d'une interaction, les variables didactiques rendent possible le fait d'enlever une interaction de l'activité pédagogique, pour focaliser un apprenant novice sur d'autres notions essentielles.

Communément en informatique nous faisons référence à ce genre de variables comme étant les paramètres de l'application. Cependant, pour lever l'ambiguïté entre les paramètres fonctionnels et pédagogiques de l'application, nous proposons d'utiliser le terme de variable didactique. La création des variables didactiques s'effectue en trois phases :

1. **Identification** des variabilités d'une activité au cours de son écriture. Cela per-

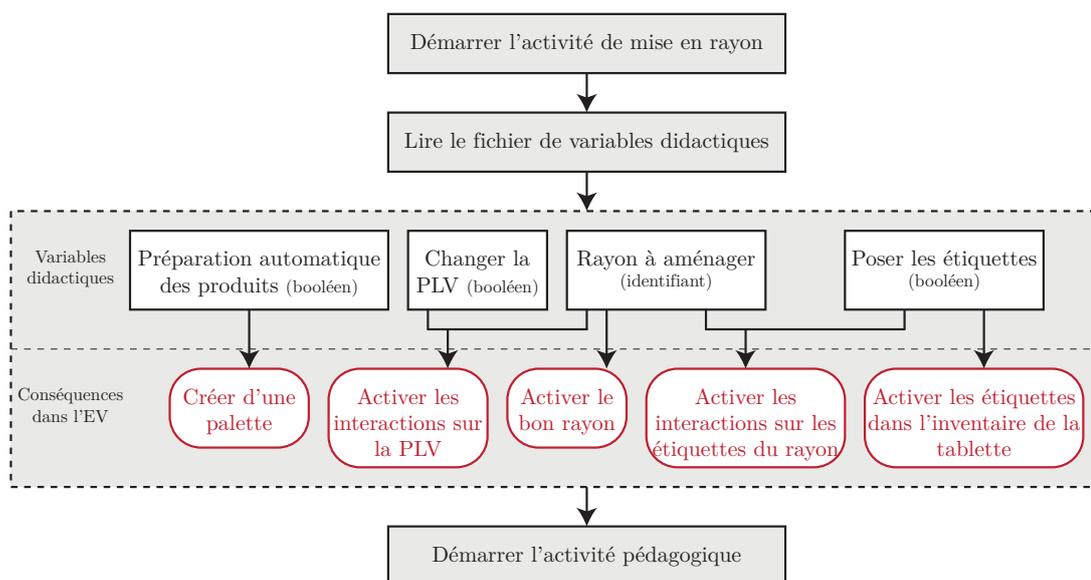


FIGURE 5.5 – Exemple simplifié de l'influence des variables didactiques sur l'EV. Chaque variable didactique déclenche automatiquement une action précise dans l'EV avant le démarrage de l'activité pédagogique.

met aux enseignants présents de valider ou non l'approche en fonction des profils des apprenants. Par exemple à cette étape nous pouvons choisir de rendre optionnelle une étape spécifique d'une activité, dans le cas où les élèves n'ont pas encore vu cet élément en cours.

2. **Programmation** des variables au sein de l'activité pédagogique virtuelle. Cette étape s'effectue à l'issue de la programmation du déroulé type de l'activité virtuelle.
3. **Création de l'interface utilisateur** permettant aux enseignants de venir activer ou non les variables.

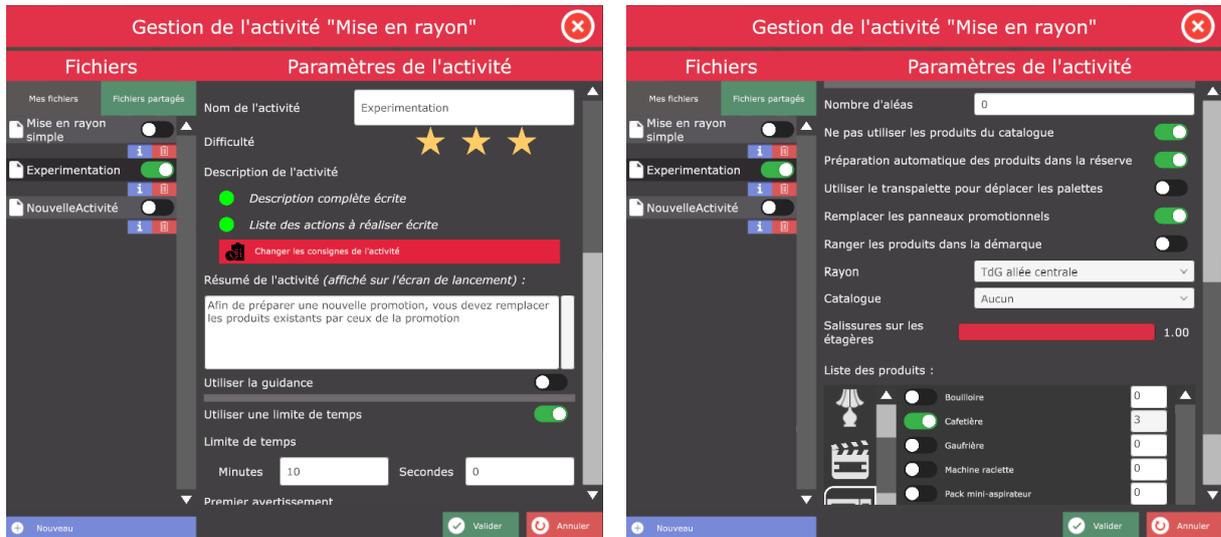
Chaque activité virtuelle *IActivity*, peut-être accompagnée d'un script de paramètres (ou options) appelés *ActivitySettings*. Les entrées-sorties du système s'effectuent par le biais d'un fichier de données JSON qui contient les paramètres du script *ActivitySettings* correspondant. Chaque fichier est générique, c'est-à-dire que le contenu global est normalisé pour en faciliter le traitement au sein de l'application.

En revanche, la partie propre à l'activité n'est interprétable que par le script de l'activité correspondante.

L'édition de ce fichier JSON (en annexe listing 2) s'effectue par l'enseignant au travers d'interfaces graphiques spécifiques (Figure 5.6). Le rôle de l'enseignant est ici central, dans le sens où il va s'occuper de créer les différentes variations grâce aux variables didactiques. Pour que l'édition soit simple, rapide et compréhensible, nous proposons des interfaces graphiques à la conception minimaliste et reposant sur des composants génériques aisément transposable dans plusieurs applications. L'approche *flat-design* nous autorise à mettre en place des visuels très épurés et proches des nouveaux standards que l'on peut rencontrer dans d'autres applications ou sur les smartphones. L'intérêt de cet étayage visuel est de limiter le temps de maîtrise par l'enseignant de ces interfaces, car ce temps de préparation est effectué en dehors de la classe. L'enseignant peut donc moduler les paramètres génériques suivants (Figure 5.6a) :

- La consigne de l'activité pédagogique.
- Une limite de temps.
- Présence ou non d'un tutoriel pour guider l'apprenant.
- Le niveau de l'activité, suivant les trois paliers définit plus tôt dans ce manuscrit (novice, intermédiaire, avancé).
- Enregistrement vidéo automatique de la session pédagogique.

D'autres paramètres propres à l'activité choisie sont également présents sur ces interfaces de variables didactiques, et ils peuvent varier d'une activité à l'autre (Figure 5.6b). Il peut donc être judicieux pour l'enseignant que le concepteur utilise une terminologie précise de manière à favoriser l'usage des interfaces par les enseignants. Par exemple les termes « activer » ou « changer » sont aisément compréhensibles. Il en est de même avec les composants visuels des interfaces, il peut être approprié d'utiliser des éléments simples tels que des radio boutons, des champs de textes ou des listes déroulantes.



(a) Les interfaces graphiques sont composées de paramètres génériques qui restent identiques d'une interface à l'autre. Facilitant ainsi le processus de gestion des variables didactiques.

(b) En plus des variables génériques, les interfaces peuvent comporter des éléments qui sont propres à chaque activité pédagogique.

FIGURE 5.6 – Exemple d'interfaces graphiques permettant à un enseignant de paramétrer des variables didactiques pour une activité de mise en rayon.

La complexité de ce module réside dans le degré de précision que l'on souhaite donner au scénario pédagogique. Donner trop de variables didactiques peut avoir un effet néfaste et perdre l'enseignant au moment de l'édition des données. Inversement, ne pas inclure de variables didactiques peut rendre le scénario virtuel moins flexible et donc le rendre inutile dans certains contextes pédagogiques. Nous rappelons que chaque lycée et chaque enseignant possède ses propres pratiques, et parfois une situation qui fonctionne bien dans un établissement peut ne pas fonctionner dans un autre. Les variables didactiques laissent donc plus de latitude aux enseignants pour adapter leurs pratiques pédagogiques avec la RV.

5.3 Exploitation pédagogique

La RV est un outil, pour que ce dernier soit utile aux enseignants il est judicieux d'inclure des éléments exploitables en dehors du monde virtuel. En effet, dans une

utilisation sur le terrain, l'exploitation pédagogique se fait généralement après la session virtuelle. Bien qu'une première approche soit possible grâce au tutorat synchrone (sous-section 4.2.5). Nous allons présenter dans cette section des recommandations d'usage des traces numériques pour permettre une utilisation en contexte de formation professionnelle.

5.3.1 Avant la session virtuelle

Comme nous venons de le voir, avant de débiter une session virtuelle, un enseignant peut paramétrer l'activité pédagogique grâce aux variables didactiques. En plus de cette préparation, nous proposons une autre modalité d'exploitation pédagogique reposant sur l'utilisation de ressources numériques issues du monde virtuel, afin de préparer une session virtuelle. Ces ressources peuvent être l'utilisation du plan du monde virtuel pour y travailler les risques incendies ou alors le fait de demander aux élèves de travailler l'agencement d'une chaîne de production. L'exploitation de captures d'écran de l'EV peut également être utile aux enseignants, comme pour demander aux apprenants de déceler des erreurs telles qu'un mauvais balisage autour d'une zone à risque ou encore un manque de produits dans un rayon d'un magasin.

Les méthodes d'exploitation sont nombreuses et il convient de donner aux enseignants une quantité suffisante et variée d'éléments garantissant une utilisation « hors numérique » convaincante. Pour les enseignants, les utilisations des données issues du virtuel en dehors de ce dernier est une approche pertinente. Favorisant une intégration dans la classe et dans les pratiques existantes d'enseignement. L'utilisation de ces ressources numériques en dehors du monde virtuel constitue également un élément approprié pour mettre en place une certaine continuité et cohérence des activités pédagogiques, notamment en instaurant une routine « Préparation, Réalisation, Débriefing ». Cette continuité est bénéfique, car l'élève possède déjà des informations à propos de la situation virtuelle, voire dans certains cas, il doit juste appliquer son travail préparatoire lorsqu'il sera en immersion. Dans ce cas-là, le monde virtuel se comporte comme un simple outil dans lequel une planification est appliquée.

5.3.2 Gestion des traces numériques

La RV nous permet d'observer, qualifier et quantifier tous les événements qui se produisent en son sein. Pour la formation professionnelle, les traces sont pertinentes, elles apportent des détails sur l'intégralité du contexte de la session virtuelle. La RV autorise une évaluation plus objective par rapport à son équivalent réel où parfois la simple observation ne suffit pas.

Par exemple dans une activité de réparation de prise électrique pour une habilitation électrique BS, une observation est nécessaire pour savoir si l'apprenant a bien respecté les consignes de sécurité. Si les fils de la prise sont arrachés, alors l'élève BS ne peut pas intervenir procéder à l'activité, il faut une zone de sécurité. Alors que si les fils ne sont pas débranchés alors un profil BS peut procéder à la réparation. En réel, un observateur doit s'assurer de cela, et compte tenu de la nature même de l'activité, il est très compliqué d'observer ces petits détails, d'autant plus que l'élève se trouve devant l'objet à observer. Par conséquent, en conditions réelles, cette observation demande d'interrompre l'apprenant pour lui poser la question ou alors observer plus précisément la situation. Cela peut avoir pour effet de déranger l'apprenant voire même de lui indiquer indirectement un élément de réponse. S'il a oublié de vérifier les fils et commence à effectuer la réparation, alors la question « *Comment sont les fils ?* » peut rappeler les éléments vus en cours et l'élève peut se rendre compte qu'il n'est pas habilité pour continuer l'activité. En situation virtuelle, l'observation peut être plus fine et moins intrusive. Le système a la possibilité de prendre une photographie ou de consigner l'état de la prise, ou alors l'enseignant peut grâce au module de tutorat synchrone, contrôler l'état des fils sans interrompre l'élève. Si l'apprenant fait une erreur, ce n'est pas grave, car il n'y a pas de risques réels, et cette erreur pourra être exploitée lors d'un entretien d'explicitation.

Grâce aux traces issues de la RV, il est possible d'aller plus loin dans le processus de constatation des faits et l'enseignant est là pleinement dans son rôle. Les traces doivent donc être multiples, variées et bien implémentées. Il n'est pas souhaitable de garder l'intégralité des événements qui se déroulent dans le monde virtuel dans un fichier, car cela est :

1. **Couteux en ressources informatiques.** Enregistrer toutes les données constamment peut consommer des ressources informatiques conséquentes, or en contexte de RV, il est judicieux de garantir à l'utilisateur un taux de rafraîchissement élevé et constant (ex. : 90Hz pour le HTC VIVE).
2. **Peu pertinent pédagogiquement.** Connaître toutes les positions et rotations de l'élève à la *frame* prête n'est guère pertinent pour l'enseignant. Surcharger les traces de données techniques superflues a un impact négatif sur l'exploitation pédagogique. Par ailleurs, pour être exploitables par les enseignants, nous recommandons d'utiliser une sémantique précise à propos des traces. Notamment avec l'emploi d'une terminologie précise qui demande une préparation supplémentaire pour le concepteur lors de la transformation des traces en indicateurs précis.
3. **Complexe en termes de programmation.** En effet, prévoir d'enregistrer l'intégralité de la scène requiert une approche informatique différente, car il faut gérer l'enregistrement en temps réel ou différé de toutes les données. Par conséquent, cela soulève par la même occasion la question de la relecture de ces données pour les rendre plus lisibles.

Nous proposons également comme traces numériques, des données multimédias, comme la prise de photographies grâce à la tablette ou au tutorat synchrone. Ces données peuvent également être accompagnées de l'enregistrement vidéo de l'intégralité de la session virtuelle. Cette fonction est intéressante pour montrer par exemple à la classe entière une situation réalisée par un professionnel ou tout simplement pour revenir sur l'action virtuelle. Une autre approche pour visualiser l'action de l'apprenant consiste à utiliser les techniques modernes de *streaming* afin de projeter la situation immersion en cours de réalisation dans une autre pièce de l'établissement. Cette modalité d'exploitation peut permettre une implication du reste de la classe pendant une situation immersive.

Les traces numériques doivent donc, comme les variables didactiques, être préparées au moment de la conception pédagogique des activités par les enseignants et le concepteur. Les enseignants vont sélectionner les traces les plus pertinentes et le

concepteur va pouvoir guider ce processus en indiquant la faisabilité des propositions des enseignants. La sémantique précise à appliquer est également discutée ici par les enseignants, car le concepteur peut ne pas connaître les bons termes pour qualifier les indicateurs de performances issus des traces. La forme de ces données numériques est fonction du type d'exploitation voulu en fin d'activité virtuelle. Dans notre cas d'étude, nous souhaitons donner la possibilité à l'enseignant de revenir sur la session pédagogique, notamment grâce à un entretien d'explicitation.

5.3.3 L'approche par rapport d'activité

Nous proposons une formalisation des traces sous la forme d'un rapport d'activité (Figure 5.7). Il est composé des différents indicateurs de performance retenus au moment de la conception pédagogique. Ces tâches ont été observées pendant le déroulé de l'activité pédagogique grâce au module d'activité et sont consignées dans un document PDF exploitable par la suite en dehors du monde virtuel par l'enseignant ou l'apprenant. L'objectif de ce rapport est de servir de base de travail soit pour un entretien d'explicitation, soit pour d'autres méthodes pédagogiques voulues par l'enseignant. Chaque observable du rapport est préparée par le concepteur à partir des éléments préparés par les enseignants au moment de la conception de l'activité pédagogique. Ensuite, lors d'une session virtuelle, lorsque les conditions d'observation sont remplies, le système sauvegarde l'observable dans le rapport d'activité. D'un point de vue informatique la génération du rapport d'activité s'effectue en plusieurs étapes (Figure 5.8) et est composé de différents éléments de programmation (Figure 5.9) décrits dans le tableau 5.1.

Il est important de veiller à ce que les données présentes dans le rapport ne soient pas trop nombreuses. Par exemple, il n'est pas intéressant d'indiquer le nombre de fois que l'utilisateur a ouvert la porte des vestiaires de l'usine dans laquelle il doit effectuer une activité. Au contraire une donnée plus globale peut être mise en place comme le temps passé dans chaque zone du monde virtuel. C'est pourquoi la création des indicateurs doit être effectuée avec les enseignants pendant la conception de l'activité pédagogique, car le concepteur peut ne pas savoir quels éléments sont pertinents pédagogiquement.

Tâche	Compétences	Réalisation
Action n°4	C18-510	DDT contrôlé immédiatement avant la VAT
Réaliser une VAT	<ul style="list-style-type: none"> Effectuer la Vérification d'Absence de Tension (VAT). 	VAT entre le PE et le Neutre
		VAT entre la Phase et le Neutre
		VAT entre le PE et la Phase
		VAT entre 0V et le +24V sortie AL1
		VAT entre le PE et le 0V sortie AL1
		VAT entre le PE et le +24V sortie AL1
		Ordre PE-Neutre, PE-Phase, Phase-Neutre respecté
		Ordre PE-0V, PE-24V, 0V-24V respecté
		DDT contrôlé immédiatement après la VAT

FIGURE 5.7 – Exemple de rapport d'activité pour une activité d'habilitation électrique B1.

Dans le cas où l'indication du temps passé dans chaque zone est de zéro pour la pièce comportant l'erreur, cela signifie alors que l'élève n'a pas vu l'erreur, car il n'a pas navigué dans la zone. Le système peut être capable de souligner ce genre d'erreurs. Cependant, dans le cas où l'élève passe plusieurs fois devant l'erreur sans la relever, alors l'application ne peut pas dire pourquoi l'anomalie n'a pas été vue. Le rapport d'activité a donc pour vocation de donner des indications sur l'état de la réalisation sans pour autant apporter d'élément comme des notes ou des indications comme « Scénario réussi » ou « Scénario échoué ». Le rapport d'activité contient des indicateurs dont l'interprétation finale revient à l'enseignant.

5.3.4 Entretien d'explicitation

Nous venons de voir que les traces numériques sont un élément important pour pouvoir permettre une utilisation pédagogique de la RV. L'entretien d'explicitation (Guigue-Durning, 1996) est une première possibilité d'exploitation pédagogique des traces nu-

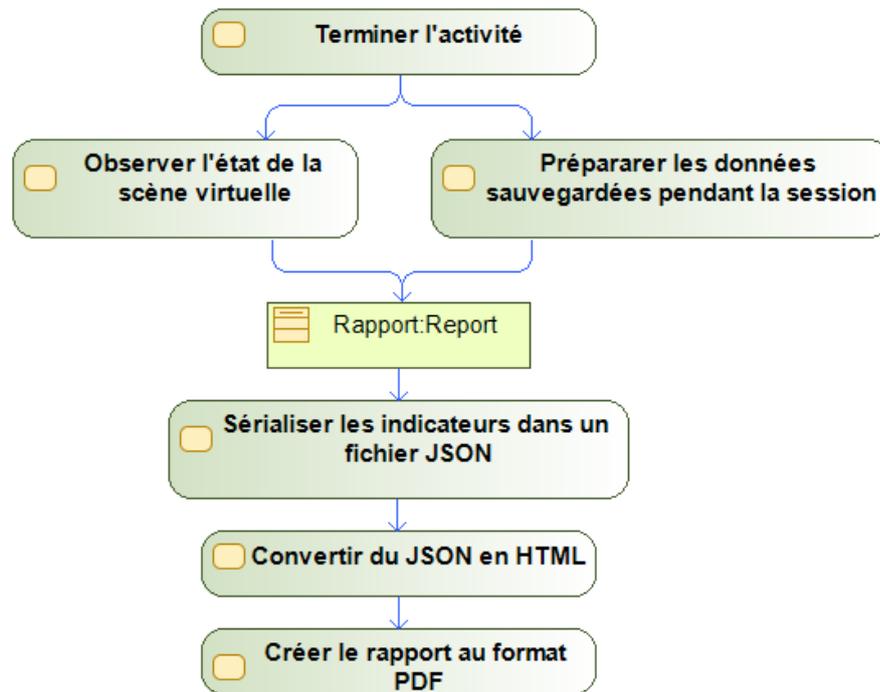


FIGURE 5.8 – Processus de génération d'un rapport d'activité.

mériques, ainsi que de la RV en formation professionnelle de manière générale. Pour un apprenant, travailler des compétences ne se limite pas à faire à une simulation ou réaliser un geste difficile (Perrenoud, 2001), et pour l'enseignant son travail ne se restreint pas à mettre une note pour chaque réalisation. En formation, nous pouvons distinguer deux approches principales d'évaluation. L'évaluation formative, qui consiste à soutenir le processus d'apprentissage et à soutenir l'apprenant pour atteindre les objectifs de formation (Perrenoud, 2001). Puis l'évaluation sommative, parfois nommée évaluation certificative. Elle intervient en fin de parcours, pour faire le bilan de l'apprentissage visé. L'entretien d'explicitation peut couvrir ces deux méthodes d'évaluation. En effet, l'utilisation d'un rapport d'activité lors d'un entretien d'explicitation peut permettre à un enseignant d'isoler des faiblesses dans la stratégie d'action mise en place par l'apprenant lors de l'activité virtuelle. Il s'agit là d'une utilisation à but formatif du débriefing. Il est également possible d'exploiter les données du monde virtuel lors d'un entretien à but sommatif, où l'enseignant va exploiter les indicateurs de performance pour faire l'évaluation des apprentissages acquis. Les données sont donc identiques, mais l'exploitation qui en est faite par l'enseignant diffère, soit dans une démarche de

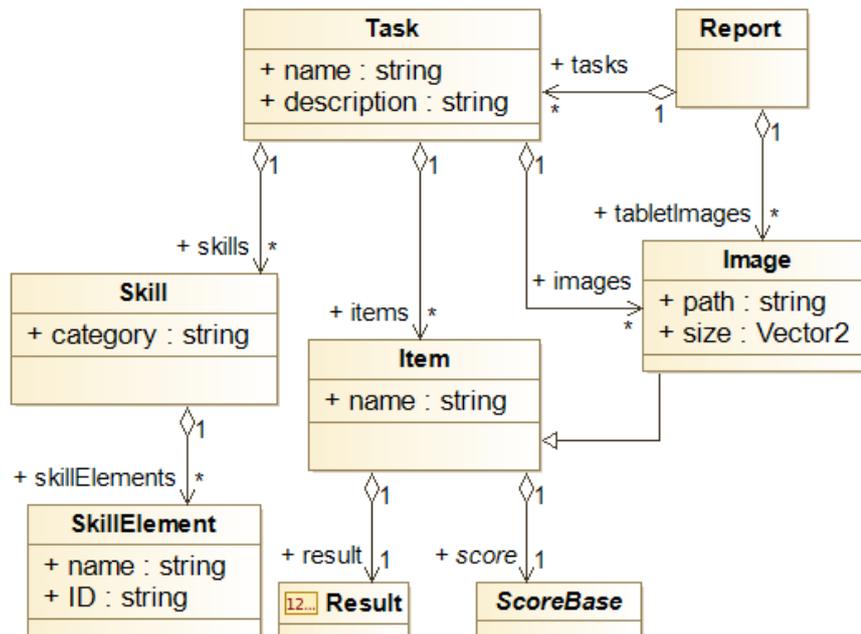


FIGURE 5.9 – Diagramme de classe simplifié de la structure informatique d'un rapport d'activité.

progression, soit pour une validation des acquis.

Pour se faire, l'apprenant doit être capable d'expliquer le cheminement intellectuel et opératoire mis en œuvre pendant l'activité. Faire une action sur une machine « *Parce qu'on m'a demandé de le faire* » n'apporte finalement que très peu d'éléments pédagogiques, seulement des habiletés et du travail de la gestuelle. Questionner l'apprenant et lui demander de revenir sur la session ou un élément précis de la réalisation (Martinez, 1997) constitue là une grande valeur ajoutée de la RV. Cela permet de commenter le « comment » de l'action (Radigois, 2018). L'entretien est un exercice que certains enseignants utilisent déjà dans quelques situations pédagogiques, notamment grâce à des captures vidéo d'activités sur le plateau technique. Dans ce cas précis, la vidéo sert de support à un temps d'échange entre l'enseignant et l'élève. La RV, grâce aux traces énoncées plus tôt, peut servir de support à la conduite d'un entretien d'explicitation. Le rapport d'activité généré contient les informations essentielles pour cerner le contexte de réalisation de la session virtuelle. Il n'existe pas de guide universel à la conduite d'un entretien d'explicitation à propos d'une activité virtuelle, le contexte et

Type	Description
Task	Il s'agit des différentes étapes de l'activité.
Skill	Chaque tâche est associée à une compétence, ou un élément précis d'un référentiel. Cette association est renseignée lors de la conception de l'activité pédagogique par les enseignants, puis elle est implémentée dans l'activité par le concepteur. De cette manière la récupération des compétences pour le rapport d'activité est réalisée automatiquement par le système. Inscrire les compétences dans le rapport d'activité permet de guider l'enseignant lors l'exploitation de ce document.
Item	Chaque tâche est composée d' <i>item</i> qui représente différents éléments caractéristiques de la tâche décrite.
Image	Il est possible de renseigner des images dans les rapports d'activités. Elles peuvent provenir de captures automatiques ou alors des images issues de la tablette virtuelle.
Result	Différents types de résultats sont possibles pour chaque item, ce qui permet de visualiser rapidement quels éléments ont été réalisés ou oubliés par l'apprenant. Des éléments de progressions sont aussi possibles dans notre approche, donnant lieu à une meilleure mise en forme pour l'enseignant des différents éléments du rapport d'activité.

TABLEAU 5.1 – Représentation des éléments informatiques qui composent un rapport d'activité.

les profils des acteurs impliqués vont donc guider la mise en œuvre de cette étape. Il est donc pertinent de proposer plusieurs approches pour les enseignants, de manière à pouvoir s'adapter aux situations rencontrées sur le terrain. Nous proposons plusieurs approches, élaborées conjointement avec des enseignants de différents établissements lors des sessions de conception d'activités virtuelles (chapitre 6) ou encore lors nos entretiens post-expérimentaux. Les différentes affinités des enseignants avec la RV, de même que leurs pratiques pédagogiques nous ont permis de proposer les approches suivantes :

- Analyser le rapport d'activité avec l'élève pour débriefer au fur et à mesure.
- Accorder un temps de parole en autonomie à l'élève avant de commencer les échanges. Une accroche peut-être « *Peux-tu m'expliquer ce que tu as fait dans le monde virtuel ?* ». Il s'agit d'une méthode pertinente, car les élèves ont tendance à rester mutiques et très peu bavards lorsqu'il s'agit de restituer une situation (ex. : « *C'était bien, j'ai pris mon matériel et j'ai réparé le bloc lumineux* »). En donnant ce temps de parole à l'élève, ce dernier peut travailler ses compétences de restitution et de synthèse. Lors de nos interviews post-expérimentaux, les enseignants ont précisé que ce travail oral de restitution n'est pas souvent mis en place, notamment par manque de support approprié pour appuyer les dires de l'apprenant.
- L'enseignant peut effectuer une première analyse du résultat de la session vir-

tuelle pour ensuite orienter ses échanges sur les éléments demandant des explications supplémentaires. Cela permet de centrer plus facilement les échanges entre l'enseignant et l'élève.

- Une autre approche peut être l'utilisation des méthodes précédentes, mais accompagnées de la capture vidéo de la session virtuelle. Il est en effet possible d'activer la capture vidéo, qui peut se montrer assez efficace lorsqu'il s'agit de lever une ambiguïté ou de montrer un élément critique à l'élève.
- Exploitation en classe entière. L'enseignant utilise un rapport d'activité et effectue l'analyse du travail avec l'intégralité de la classe, ce qui permet d'avoir une activité pédagogique de groupe. De plus, les rapports peuvent être anonymisés, ce qui évite les situations de moqueries que les enseignants ont soulignées à plusieurs reprises durant nos interviews.
- Échanges entre élèves. Cette approche peut reprendre celles précédemment évoquées, mais la situation n'est plus élève-enseignant, mais élève-élève. Il s'agit d'un exercice que certains enseignants utilisent déjà lorsque les conditions de gestion de la classe le permettent.

Ces propositions sont non exhaustives, et seuls les enseignants peuvent déterminer quelle est l'approche la plus intéressante ou laquelle correspond le plus à leur choix de méthode d'enseignement. En effet, chaque interview que nous avons menée avec des enseignants à propos de l'usage de la RV en contexte de formation nous apporte des nouvelles pistes d'exploitation. Cela permet d'étoffer les propositions d'exploitation pédagogique en fonction des nombreux contextes d'apprentissages présents dans la formation professionnelle. Par conséquent, pour que l'exploitation pédagogique d'une situation soit efficace à la fois pour une approche formative que sommative, il est préférable de proposer des méthodologies flexibles ainsi que suffisamment de traces numériques pour que chaque enseignant puisse exploiter l'EVAH en fonction de ses besoins. L'autre intérêt de cette flexibilité d'évaluation réside dans l'exploitation transversale des résultats de la session virtuelle par des enseignants d'autres filières. Il peut être pertinent pour ces derniers d'utiliser les traces numériques pour appuyer d'autres apprentissages. Par exemple, après une activité de chasse aux erreurs, il peut être en-

visageable d'utiliser les photographies prises par l'apprenant avec la tablette afin pour lui demander de rédiger des explications comme « *En quoi est-ce une erreur ?* » ou encore « *Pourquoi as-tu pris cette photographie ?* ». Ces utilisations transversales de la session virtuelle ou des traces sont intéressantes, car cela permet d'impliquer l'outil pour plusieurs exploitations pédagogiques. Cela garantit également une meilleure utilisation de la technologie au sein des établissements.

5.4 Synthèse

Nous proposons dans ce chapitre une méthode pour la conception d'applications de RV adaptée à la formation professionnelle (Figure 5.1). Cette proposition repose sur des approches décrites dans la littérature, comme la capitalisation des résultats ou encore la conception collaborative de contenus avec les enseignants. Dans cette dernière approche, l'utilisation d'exemples tangibles déjà implémentés favorise la qualité de la conception d'une nouvelle activité virtuelle, en indiquant aux enseignants ce que l'on peut faire ou ne pas faire dans un EVAH. En effet, comme nous l'avons indiqué, les enseignants ne sont pas forcément au fait des possibilités de cette technologie. Il convient donc de décrire son fonctionnement, ses possibilités ainsi que ses usages possibles avec les apprenants.

La conception d'une activité pédagogique est à mettre en correspondance avec les compétences et les méthodes d'enseignements. Cela constitue l'étape la plus importante du processus de création pour un usage en formation professionnelle. Nous avons également souligné dans ce chapitre qu'il existe des différences entre les filières, ce qui peut influencer le processus de conception pédagogique. En effet, les enseignants peuvent avoir un degré d'affinité plus ou moins important avec les différentes méthodes de conception d'activité proposées.

Nous avons également identifié trois situations types qu'un concepteur peut rencontrer lors de la création d'une situation pédagogique virtuelle en formation professionnelle. Ces trois situations peuvent influencer le processus de conception de l'activité, soit en impliquant la mise en place d'une approche exploratoire, ou alors en impliquant une étape de réification conduisant à rendre compatible la demande du client

(enseignants, inspecteurs académiques ou DDFPT) avec l'approche d'implémentation proposée. Dans ce contexte, nous avons également fait le choix de ne pas mettre en avant un formalisme précis comme on peut en trouver dans la littérature, car imposer une méthode aux enseignants constitue pour certains un frein soit à la créativité, soit vis-à-vis du référentiel de diplôme. Le concepteur qui assiste le processus de conception pédagogique doit donc être capable d'adapter les éléments formalisés intermédiaires en fonction de la situation.

Pour mettre en œuvre le scénario, nous proposons des modules génériques permettant aux concepteurs d'implémenter aisément les activités pédagogiques. Pour la formation professionnelle, le concepteur peut ainsi gérer plusieurs types de scénarios comportant différents degrés de liberté pour l'utilisateur. Dans le cas d'une procédure précise, l'apprenant n'a pas grande latitude d'actions, ce qui facilite la détection d'erreurs par l'application. En revanche, pour une activité pédagogique impliquant une plus grande liberté d'action, alors le système peut avoir plus de difficultés à juger la performance de l'apprenant. Il est donc congru de prendre en compte ces différences dans la façon d'implémenter une activité dans le monde virtuel. Cette gestion de l'implémentation s'accompagne d'une possibilité pour l'enseignant de venir agir sur quelques éléments du scénario grâce aux variables didactiques. Cette approche de variabilité est pertinente pour les enseignants, car ils peuvent modifier des éléments clefs du scénario sans avoir à éditer le code de l'application ou utiliser des outils informatiques complexes. Nous avons mis cela en avant grâce à des interfaces utilisateur simples dans le but de réduire le temps mis pour créer ces variations d'activité.

Nous venons de voir que les variables didactiques peuvent être nombreuses, il convient donc de préparer ces dernières au moment de l'écriture du scénario pédagogique, car une trop grande quantité d'éléments modifiables peut nuire à l'utilisation de l'outil par les enseignants. Gardons à l'esprit que comme pour les apprenants dans l'EV, le temps de préparation des sessions est limité pour les enseignants, c'est pourquoi il est judicieux que les concepteurs mettent en place des solutions qui facilitent l'utilisation de l'outil virtuel.

Le processus de conception d'un EV de formation peut également prendre en compte les modalités d'exploitation de la RV au sein de la classe. C'est pourquoi les

concepteurs doivent également mettre en place des approches autorisant les enseignants à évaluer la performance d'un apprenant en situation de RV. Nous avons donc proposé la mise en place d'un rapport d'activité comportant des indicateurs de performance et des données objectives. Ce formalisme ne donne pas de notation, c'est à l'enseignant qu'il revient d'exploiter le document au regard du contexte pédagogique. Nous proposons donc un cas emblématique d'exploitation qui est l'entretien d'explicitation utilisant le rapport d'activité comme support. De plus, nous soulignons l'importance de donner à l'enseignant suffisamment de données pour qu'il puisse mettre en place une exploitation pertinente pour ses besoins. C'est notamment le cas en proposant un enregistrement vidéo, des captures d'écran ou encore des données extraites du monde virtuel pour pouvoir créer un exercice en dehors de l'EV. Ces possibilités pédagogiques sont pour les enseignants des éléments plus importants que les approches techniques comme les interactions 3D. Ils cherchent, en effet, la pertinence pédagogique avant la pertinence technique, c'est pourquoi dans ces étapes de conception de scénario, l'étayage a également toute sa place.

IMPLÉMENTATIONS DE SCÉNARIOS PÉDAGOGIQUES ET ÉVALUATION DE LA PROPOSITION

Nous venons de voir dans les deux chapitres précédents différentes approches informatiques et conceptuelles permettant de mettre en place des scénarios pédagogiques virtuels. Le principe d'étayage a pour but de proposer des interactions 3D aisément utilisables et compréhensibles par les apprenants dans un contexte virtuel. Nous avons également mis en avant le principe de variables didactiques, autorisant les enseignants à moduler certains éléments clefs du monde virtuel pour rendre la situation appropriée aux apprenants. Nous venons également de discuter une approche générale de conception pédagogique. Celle-ci vise à améliorer l'intégralité du processus créatif qui implique à la fois les enseignants, mais également les concepteurs et d'autres référents pédagogiques tels que les inspecteurs académiques.

Nous détaillerons dans ce chapitre, une application de ces éléments conceptuels pour la création de trois contextes de formation virtuelle : le diplôme du Bac Pro Commerce, une situation de Pilotage de Ligne de Production et une revue de chantier. Ces trois domaines professionnels, bien qu'éloignés, nous ont permis d'appliquer et de valider notre approche générique de conception. Nous évoquerons plus précisément dans ce chapitre le processus de création et d'implémentation de l'application destinée au Commerce. Nous avons mené une expérimentation du scénario Commerce auprès d'apprenants et d'enseignants de cette filière afin de valider nos approches conceptuelles et informatiques génériques. De plus, cette expérimentation constitue pour les enseignants de filière professionnelle une première mise en œuvre concrète de la RV en contexte réel de formation dans des lycées professionnels. Nous terminerons ce chapitre par une discussion des résultats de l'expérimentation.

6.1 Scénario pédagogique pour le BAC Pro Commerce

Nous avons conçu et mis en œuvre des méthodes de conception d'activité pédagogique virtuelle ainsi que le développement des briques génériques pour proposer des activités pédagogiques en RV dans le cadre du diplôme du Bac Pro Commerce. Le référentiel de 2003¹ a servi de base de travail pour l'élaboration d'une application de RV destinée aux apprenants de ces filières (du CAP au BTS). Ce référentiel a également été réformé pour la rentrée 2019², ce qui nous a permis d'expérimenter une migration de référentiel pour les activités pédagogiques déjà implémentées (modification des compétences à mettre en relation avec chaque activité pédagogique). Nous allons détailler dans cette section l'application du processus d'écriture d'activité pédagogique, l'implémentation de ces activités, ainsi que les premiers tests sur le terrain avec des élèves dans les lycées professionnels de l'académie de Nantes.

6.1.1 Écriture des activités pédagogiques de l'EVAH

Pour concevoir les activités pédagogiques, nous avons suivi une approche exploratoire. Un groupe de travail a donc été créé dans le but d'étudier la faisabilité de l'utilisation d'une application de RV pour les élèves de BAC Pro Commerce. Ce groupe de travail était composé de l'inspectrice académique en charge de ce diplôme, d'enseignants de cette filière de plusieurs lycées de l'académie de Nantes (9 participants) et également d'un référent technique, l'auteur de ce manuscrit. La composition des groupes de travail a varié au cours des sessions, en raison des contraintes d'agendas de chacun, de ce fait, les enseignants participants aux réunions de travail ont parfois changé d'une session à l'autre. Nous avons organisé 5 réunions de travail s'étalant sur un an, de 2017 à 2018 dont une nouvelle rencontre début 2019 afin de mettre à jour l'application pour le nouveau référentiel afin de préparer une expérimentation dans des lycées. Deux prétests ont également été réalisés pendant cette période dans un lycée

1. <https://eduscol.education.fr/referentiels-professionnels/a049/a049a2.pdf>

2. https://eduscol.education.fr/referentiels-professionnels/BacPro_MetCoVe/Annexes_BacPro_MetCoVe.pdf

professionnel en présence d'apprenants de CAP pour le premier test et des apprenants de Seconde et Première Commerce / Vente pour la seconde session de tests. Lors de ces réunions de travail, chaque participant a eu un rôle précis dans la conduite de ces réunions de travail :

- **L'inspectrice** a organisé les réunions de travail, c'est-à-dire qu'elle a permis au groupe de se rencontrer dans des établissements de l'académie, en contactant les chefs d'établissements, et en réalisant des convocations pour les enseignants. Par ailleurs, elle a été une interlocutrice essentielle, grâce à son point de vue plus global des pratiques pédagogiques liées au diplôme (référentiel, compétences des apprenants, différences entre les établissements, profil et attentes des enseignants de cette filière). De ce fait, ce rôle permet de débloquent des situations potentielles où les autres participants n'arrivent pas à s'accorder, car les contextes pédagogiques des uns et des autres peuvent être différents. Il convient alors de prendre des décisions qui soient les plus objectives possible par rapport au diplôme, et les inspecteurs académiques sont ici parfaitement dans leur rôle. La connaissance des pratiques pédagogiques de manière générale, fait de l'inspecteur académique un interlocuteur pertinent lors de l'élaboration des variables didactiques, notamment en soulignant les difficultés d'usages potentielles des apprenants et des enseignants. De plus, ce point de vue global est pertinent lors de la mise en place d'un processus d'étayage d'une interaction virtuelle, ou encore à propos des possibles erreurs de sémantique ne correspondant pas au référentiel. Enfin, un inspecteur a également un rôle d'animateur où il peut organiser les différentes phases des réunions autour de l'utilisation de l'outil virtuel (prototypes, situations capitalisées), de l'explicitation des pratiques de chacun (concepteur et enseignants) et la conception des activités.
- Le rôle des **enseignants** est de transposer une activité réelle en activité virtuelle en détaillant chaque étape du scénario pédagogique. Ils sont directement au contact des apprenants et ils connaissent les attentes pédagogiques du référentiel (compétences, activités, évaluations) ainsi que la réalité du terrain, à savoir l'organisation des travaux pratiques, les profils des apprenants, les difficultés du quotidien ainsi que les attentes des entreprises qui prennent en stage des apprenants. Il s'agit des connaissances essentielles pour la conception

d'activités pédagogiques pertinentes, car chaque étape discutée du scénario peut être appuyée d'éléments concrets rencontrés par les enseignants. Lors de l'utilisation de l'outil virtuel, les enseignants vont également avoir un rôle d'utilisateur, notamment à propos du poste de tutorat synchrone, des variables didactiques ou encore de l'exploitation générale de l'outil, avec, par exemple, le rapport d'activité. C'est pourquoi leurs avis avant l'implémentation sont appropriés, car cela vient enrichir dès les premiers instants du projet la qualité des réalisations, que ce soit dans les possibilités d'usage pédagogique, la sémantique ou encore dans la pertinence de l'étayage. Nous soulignons également ici que le manque de connaissances techniques à propos de la RV constitue un avantage pour la conception des activités, car les remarques spontanées des enseignants peuvent refléter un peu plus la possible réalité du terrain lors de l'exploitation de l'outil par d'autres enseignants. De cette manière, les corrections apportées aux problèmes de logique, de complexité d'usage ou de non-sens pédagogique peuvent être plus pertinentes que si les enseignants étaient des experts en RV. Cela est néanmoins faisable qu'à condition que le concepteur qui accompagne les enseignants dans la conception pédagogique explicite convenablement les possibilités techniques de la RV. Dans notre application au Bac Pro Commerce, les échanges ont été enrichis des expériences professionnelles des enseignants présents lors des réunions. En effet, tous ont déjà travaillé en magasin avant d'enseigner. Nous pensons que ces connaissances supplémentaires ont été bénéfiques aux échanges. En revanche, cela n'est pas forcément reproductible dans toutes les filières de la formation professionnelle. Dans ce cas, la présence d'un professionnel peut être envisagée, pour avoir un nouveau point de vue sur l'activité pédagogique en cours de conception.

- Le **concepteur** a endossé ici le rôle de référent technique. Il peut également accompagner l'inspecteur académique dans l'animation des réunions en choisissant, lorsque cela est opportun, d'utiliser la RV (prototypes ou autres scénarios capitalisés) pour appuyer les dires d'un participant. C'est-à-dire que dans ce contexte, il est généralement le seul à avoir des connaissances précises sur la RV ainsi que son usage dans un contexte de formation professionnelle. La première interrogation des enseignants peut être « Comment expliquer aux apprenants qu'il ne faut pas jouer ». C'est donc au concepteur qu'il convient

d'expliciter les pistes d'exploitation de l'outil, tout en veillant à être ouvert à d'autres propositions. Tout au long de ce processus de conception pédagogique, le concepteur va appuyer les échanges avec des éléments techniques, par exemple, en expliquant qu'une interaction décrite par les enseignants est réalisable ou non. Ce rôle de conseiller technique est ici selon nous primordial, car les enseignants peuvent avoir tendance à vouloir reproduire la réalité, il faut donc poser des limites aux interactions afin de s'assurer que le scénario ne soit pas trop complexe à réaliser. Enfin, le concepteur a également un rôle décisionnel sur les activités, dans le sens où il va valider ou non le séquençement de ces dernières en mettant l'écriture pédagogique en parallèle avec la réalisation technique des interactions ainsi que des observations à mettre en place pour la génération d'indicateurs de performance.

L'étape de vulgarisation des activités a été essentielle, car au départ, les enseignants ne sont ni convaincus par l'utilité de la RV pour la filière du Commerce ni au fait des possibilités offertes par cette technologie. Il s'agit d'une filière qui possède très peu d'équipements numériques (Bourgouin, 2017), alors que les enseignants doivent de plus en plus intégrer la technologie dans les cursus, comme l'utilisation de logiciels de gestion de magasin, d'encaissement, ou encore, former aux bons usages d'internet et des ressources telles que les réseaux sociaux. Dans la filière commerce, l'outil informatique *FrontShop*³ est utilisé dans certains lycées pour former, entre autres à la gestion de stock ou d'encaissement. Par ailleurs, nous avons rencontré ces réticences plusieurs fois sur le terrain, où des a priori vis-à-vis de la technologie subsistent à cause du manque de communication sur les usages de la RV. Le dialogue, accompagné d'exemples précis tels que des scénarios virtuels ou les briques fonctionnelles aident à amener de façon progressive et constructive la technologie auprès des enseignants.

À l'issue de plusieurs réunions de travail, et d'une matinée d'observation des tâches professionnelles dans un hypermarché, nous avons formalisé sept activités fondamentales qui pourraient bénéficier de la RV. Ces dernières ont pour objectif de couvrir des compétences précises du référentiel du diplôme, à savoir le bloc 4A de ce dernier (en annexe C). En formation professionnelle, les apprenants travaillent des connais-

3. <http://www.frontshop.fr>

sances précises en classe, puis appliquent ces dernières dans le cadre de travaux pratiques ou de stages en entreprise dans le but de développer des compétences. Un EVAH permet donc, entre autres, d'assurer la continuité de cette formation aux connaissances en proposant à l'apprenant de mettre en pratique ces dernières. Cette continuité a été un élément important dans le choix et la conception des différentes activités pédagogiques décrites dans ce chapitre. Par ailleurs, un EVAH ne se limite pas à l'application précise d'une théorie, il peut également contribuer à expliquer à l'apprenant comment faire, en agissant comme un complément de la formation classique. Pour pouvoir mettre en place des situations virtuelles pertinentes, l'observation de l'activité professionnelle par le concepteur peut constituer une aide supplémentaire dans le cas où ce dernier ne possède pas de connaissances à propos du métier ciblé. Les activités sont donc les suivantes :

- **Inspection du magasin** : L'apprenant doit naviguer dans l'EV pour y repérer des anomalies. Ces dernières dépendent des variables didactiques et l'élève possède plusieurs façons pour indiquer la présence d'une erreur. Cela peut être en prenant une photographie à l'aide de la tablette, ou alors en cliquant sur un élément suspect. Grâce aux variables didactiques, il est possible pour les enseignants de travailler des notions plus précises comme les risques incendie, qui sont déjà enseignés dans ces filières. En effet, l'intérêt de cette activité réside dans l'application des éléments théoriques vus en cours, comme des risques incendies, les méthodes de mise en rayon ou encore les éléments liés à l'attractivité d'un rayon. Cela ajoute donc une dimension plus réaliste à ces enseignements existants, qui peuvent habituellement rester très théoriques et peu contextualisés.
- **Mise en rayon** : Il s'agit là de l'activité la plus emblématique de cette filière. Elle consiste à mettre en rayon des produits en suivant les procédures vues en classe (ex. : mise en valeur du rayon, organisation des produits, gestion de l'espace de travail). Les motivations principales de cette activité sont tout d'abord de pouvoir permettre à l'apprenant de manipuler une grande quantité de produits et d'éléments de décors, alors qu'en réel cela peut être difficilement possible (par exemple, changer la disposition des gondoles n'est pas réalisable seul et sans outils).

- **Réception d'une commande** : Cette activité consiste à réceptionner une commande et à effectuer toutes les vérifications nécessaires lors de la réception des marchandises, notamment à l'aide de documents tels que le bon de commande ou le bon de livraison. Grâce à cela, les compétences liées à la compréhension de documents spécifique peuvent être travaillées dans un EV pertinent. Cette activité est difficilement réalisable sur les plateaux techniques, car cela implique de l'espace ou de l'équipement spécifique. Cette activité a été choisie pour une transposition en virtuel en raison de la richesse possible pour la génération d'aléas (ex. : produit cassé, manquant, en trop, erreur de référence).

- **Préparation d'une commande** : La préparation de commande est une activité qui se rapproche d'une activité de type *drive*. L'intérêt de cette activité est de mobiliser les compétences d'organisation de l'apprenant, que ce soit pour la récupération des produits dans la réserve ou la préparation de la palette de produits à expédier. La procédure théorique de préparation d'une commande vue en cours peut donc être appliquée dans le monde virtuel, par exemple en permettant aux apprenants de se former aux connaissances liées au balisage d'une commande si des produits fragiles sont manipulés.

- **Inventaire d'un rayon** : L'inventaire est une activité qui a été pensée avec les enseignants pour pouvoir être réalisée par deux élèves au cours de la même session virtuelle. L'inventaire est une activité ponctuelle dans le monde professionnel, et peu de stagiaires peuvent y participer si cela se produit en dehors de la période de stage. L'apprenant doit compter les produits présents dans un rayon spécifique du magasin à l'aide d'un outil, le *Product Data Terminal* (PDT), qui permet de compter les occurrences. Nous avons fait le choix de proposer deux activités de comptage, deux apprenants pouvant ainsi confronter leurs résultats.

- **Mise en place d'une animation saisonnière** : L'animation saisonnière est l'activité la plus compliquée à mettre en place dans les établissements de formation. L'apprenant doit mettre en place un espace promotionnel comme il est possible d'en rencontrer à l'entrée des magasins ou à la sortie de ces derniers. Notam-

ment, car sur les plateaux techniques de cette filière, déplacer les gondoles n'est pas possible pour les apprenants, ce qui limite les possibilités créatives des apprenants. Cette activité implique pour l'apprenant d'avoir accès à un large panel de produits, d'éléments décoratifs, ainsi que de quoi mettre en valeur les produits (Publicité sur le Lieu de Vente, PLV). Or dans les établissements, l'accès à tout cet équipement n'est pas forcément possible, ce qui limite la mise en place d'une activité d'animation sur les plateaux techniques. L'utilisation d'un EVAH est ici appropriée, car le virtuel ajoute une réelle plus-value grâce à l'aisance de manipulation d'équipements tels que les gondoles, ainsi qu'à la diversité des produits et d'éléments décoratifs, autorisant la mise en place d'un processus créatif riche pour l'apprenant. Réaliser cette activité nécessite un temps important, même en virtuel, il est donc possible de fractionner la réalisation pour pouvoir la reprendre plus tard ou laisser un autre apprenant terminer l'implantation. C'est également pour ce type d'activité que la préparation sur table de l'activité virtuelle prend tout son sens, car elle permet de planifier la préparation des produits ou des gondoles (préparation du « squelette » du rayon). La motivation principale de cette activité pédagogique est de laisser l'apprenant libre de ses choix, de manière à pouvoir avancer ses arguments d'implantation lors d'un entretien ou d'une présentation. Cette activité est également pertinente pour les apprenants, car il s'agit d'une application concrète de l'ensemble des connaissances vues en cours.

- **Retour fournisseur et gestion du recyclage** : Cette activité consiste à récupérer des produits qui sont dans la démarque de la réserve et mettre au recyclage les éléments qui doivent y aller en respectant les normes de recyclages (respect des bacs). L'apprenant doit par ailleurs effectuer un retour fournisseur, constitué des mêmes actions que l'activité de préparation de commande, à la nuance près qu'ici les produits sont déjà préparés sur une palette. Il s'agit également d'une activité pertinente pour travailler la compétence de valorisation des déchets, habituellement travaillé en cours théorique.

Le formalisme intermédiaire décrit dans le chapitre précédent a été utilisé pour décrire les activités pédagogiques (en annexe figure A.2). Cependant, ce format a été mis de côté lors de la conception des activités, lorsque l'évaluation a été évoquée. En

effet, les activités de cette application sont des procédures moins linéaires que les approches de STI2D, ce qui a rendu l'approche peu propice à une exploitation dans le cas des activités du Bac Pro Commerce. Lors d'une réunion de travail, certains enseignants présents ce jour-là (trois sur les quatre présents) ont indiqué ne pas apprécier cette méthode en raison des freins créatifs qu'elle impose. Il en a été de même avec la proposition d'approches issues de la littérature scientifique, où l'intégralité des enseignants ainsi que l'inspectrice ont signifié leur méfiance vis-à-vis de ces méthodes. Une approche plus libre et proche des procédés de *brainstorming* ou de débats ont été mis en place vers le milieu de la conception des activités afin de mieux correspondre au profil des enseignants. Cela a contribué à l'élaboration du modèle que nous proposons dans le chapitre précédent (chapitre 5).

6.1.2 Implémentation des activités pédagogiques

L'implémentation des différentes activités pédagogiques définies dans la section précédente s'est déroulée en plusieurs étapes. Tout d'abord, nous avons conçu l'EV en nous basant sur la topologie de magasins réels de manière à proposer aux apprenants un environnement pertinent. Grâce à une journée en immersion dans un hypermarché, nous avons pu voir l'agencement type des réserves ainsi que l'organisation générale de tâches des salariés avant l'ouverture. L'objectif de cette étape de modélisation est de rendre l'EV proche de la réalité, de manière à éviter que l'apprenant ne se pose des questions sur la cohérence de l'EV. Dans notre cas, le choix des produits a été un élément important, où la présence de produits non alimentaires permet d'éviter des questions à propos du respect des normes d'hygiène ou la présence d'une chaîne de froid pour certains produits. La disposition des pièces et l'organisation de ces dernières a également fait l'objet d'une validation par les enseignants, car en tant que concepteurs, nous n'avons pas le point de vue d'un vendeur (Bourgouin, 2017).

Ces étapes de conceptions initiales ont eu lieu au début de ces travaux de thèse, et les briques logicielles n'étaient pas encore conçues. En effet, la majeure partie d'entre elles (variables didactiques, *snapping*, système d'activité, tablette virtuelle ou encore le module de guidance) sont issues de la première itération du magasin virtuel.

Plusieurs prototypes intermédiaires ont été mis au point sous forme de *bac à sable*. Cela laisse le champ libre aux enseignants d'expérimenter des fonctionnalités précises au moment de la conception des activités. L'approche par prototype *bac à sable* a permis aux enseignants d'avoir une réflexion plus précise, notamment sur l'usage des interactions virtuelles. Le processus d'étayage est donc intervenu à cet instant de l'implémentation et a été porté à la fois par le concepteur, mais aussi les enseignants qui ont utilisé leurs expériences avec le prototype.

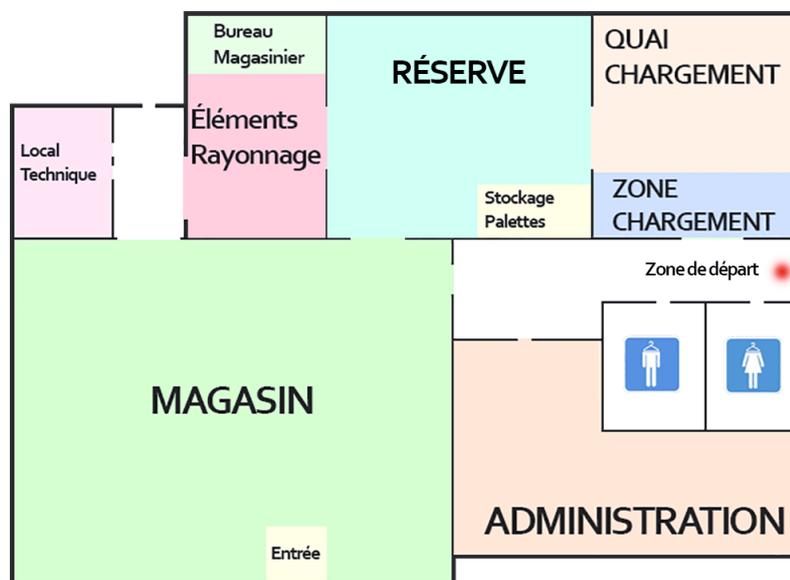


FIGURE 6.1 – Plan du magasin virtuel.

L'EV est divisé en plusieurs zones (Figure 6.1) dans lesquelles diverses activités sont possibles. Pour éviter de distraire l'apprenant, seuls les éléments utiles à l'activité en cours sont activés, grâce à l'interprétation par le système des variables didactiques spécifiées par les enseignants. L'utilisateur peut, grâce à un certain degré d'étayage, prendre les produits directement depuis la réserve (Figure 6.2) et organiser ces derniers comme il le souhaite dans des cartons ou sur des palettes. Pour les activités mobilisant des notions de créativité comme l'activité de préparation d'animation, nous donnons par exemple la possibilité à l'apprenant de changer les couleurs des produits ou les textes des éléments de PLV. Cela permet à l'apprenant de gagner du temps de réalisation. Une approche réaliste impliquerait de retourner dans la réserve pour aller chercher les bons coloris, ce qui n'est pas très intéressant pédagogiquement.

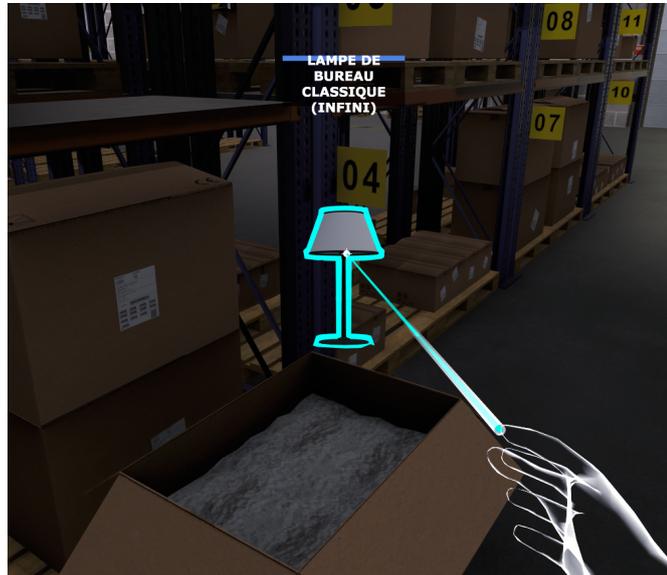


FIGURE 6.2 – Exemple d’interaction via *raycasting* pour sélectionner un objet dans la réserve du magasin virtuel.

6.1.3 Traces et exploitation pédagogique

Pour cette application virtuelle, nous avons implémenté un rapport d’activité pour chaque activité pédagogique. Ces rapports contiennent les éléments génériques détaillés plus tôt dans ce manuscrit, et également des éléments isolés lors de la conception des activités avec les enseignants.

Nous proposons également des exports de données permettant aux apprenants et aux enseignants d’utiliser les ressources virtuelles en dehors de l’environnement, lors d’un travail sur table par exemple.

À partir de ces données, les élèves peuvent aussi réaliser des catalogues promotionnels. Cette activité est elle aussi déjà réalisée dans le cas de cours en salle informatique, où les apprenants réalisent grâce à des outils de bureautique, des montages pour mettre en valeur des produits spécifiques. Un thème peut être mis en avant par l’enseignant comme la rentrée scolaire ou la période des fêtes de fin d’année. En



FIGURE 6.3 – Exemple de catalogue préparé via un logiciel de bureautique à partir des données issues de l'application virtuelle (visuels des produits).

proposant aux enseignants les données complètes des produits ainsi que des clichés sous différents angles, nous autorisons les élèves à faire des catalogues à partir des données du monde virtuel (Figure 6.3). Un autre intérêt d'utiliser les éléments du virtuel pour faire le catalogue est de mieux intégrer la RV dans le cursus classique de formation en créant un lien fort entre une activité sur table et une activité virtuelle.

6.1.4 Prétests sur le terrain

Pendant le processus de conception, nous avons effectué avec les enseignants deux prétests avec des élèves (Tableau 6.1) en conditions réelles, dans les lycées. En effet, la RV est une innovation dans les filières professionnelles, aussi bien sur le plan de la conception et de la gestion de projet que pour l'utilisation concrète avec les élèves. Par ailleurs, ces derniers pensent que la RV est réservée exclusivement pour une utilisation vidéo ludique et non sérieuse. Les enseignants n'ont pas d'expérience à propos du comportement des élèves vis-à-vis de cette technologie. Nous avons donc testé les premières activités implémentées à savoir l'inspection du magasin, la mise en rayon et la réception de produits. Ces prétests se sont déroulés sur une journée en avril 2017 dans l'établissement d'une des enseignantes participant aux réunions de travail. Les tests ont été conduits par l'inspectrice en charge du référentiel, qui était accompagnée par le concepteur de l'application. Les apprenants ont utilisé plusieurs activités,

Classe de l'élève	Dernier stage effectué	A déjà utilisé la RV
Première vente	Grande enseigne d'électroménager	Connait (testé le <i>Samsung Gear</i>)
Première vente	Magasin de vêtement	Connait, mais pas utilisé
Première vente	Magasin de chaussures	Non
Seconde commerce/vente	Grande surface alimentaire	Non
Terminale vente	Magasin de vêtements	Non
Terminale vente	Magasin de chaussures de sport	Non

TABLEAU 6.1 – Participants au premier test du magasin pédagogique virtuel.

sélectionnées en fonction de leur profile par l'inspectrice. L'intégralité des échanges lors de ces prétests a fait l'objet d'un enregistrement audio.

Ces premiers tests ont mis en évidence la nécessité de guider les apprenants lorsqu'ils découvrent l'environnement virtuel. Pour l'activité de mise en rayon, le manque de repères a été un problème pour les élèves. Ces derniers ont apprécié l'outil et le monde virtuel, ils ont passé un temps assez conséquent à s'émerveiller dans le monde virtuel et les situations d'errance ont parfois mené les élèves à se perdre et ne pas prendre des repères visuels de l'environnement. Ces prétests ont également mis en évidence que ce manque de repères peut être réduit en proposant dans un premier temps à l'élève une activité de chasse aux risques faisant office de découverte de l'EV. Elle permet de réaliser à la fois une activité pédagogique et de repérer les lieux pour avoir une meilleure orientation spatiale pour les autres activités. Dans cette première activité, l'élève choisit son rythme d'exploration et évolue en autonomie. En effet, la découverte du monde virtuel peut prendre du temps. Or le temps est un élément critique lorsque l'on considère une utilisation sur le terrain de la RV. L'enseignant ne peut pas se permettre de perdre une dizaine de minutes par élève pour effectuer une activité qui n'a aucun intérêt pédagogique. Par conséquent, en l'absence de guidance, il peut être intéressant de proposer une activité alliant découverte de l'EV et activité pédagogique, comme une chasse aux risques. Nous pouvons qualifier ce type d'activité comme étant une activité dite « *de démarrage* », ayant pour caractéristique principale, la découverte des interactions 3D et de l'EV, tout en proposant une activité pédagogique. Cette dernière ne doit pas être trop complexe, car dans une situation de découverte, l'apprenant doit gérer à la fois l'apprentissage des interactions, la prise de repères dans l'EV ainsi que l'activité pédagogique. Il est donc préférable que la charge mentale induite de l'ensemble soit appropriée. Pour que cette activité de démarrage soit pertinente, il est judicieux pour le concepteur de créer une situation virtuelle impli-

quant l'intégralité de l'EV, pour pouvoir permettre une bonne prise de repères spatiaux par l'apprenant. Il est également intéressant d'impliquer les interactions 3D les plus utilisées ou les plus complexes lors de la réalisation de l'activité de démarrage. Cela a pour objectif de limiter le temps d'apprentissage des techniques pour d'autres activités, qui peuvent être plus complexes d'un point de vue pédagogique, et donc limiter l'apprentissage de nouvelles interactions. En effet, il n'est pas pertinent d'un point de vue pédagogique de mettre en place une situation de tutoriel qui explique uniquement les ressorts techniques et d'utilisabilité sans avoir une quelconque dimension pédagogique, cela constitue une perte de temps pour l'apprenant et l'enseignant.

Lors de ces prétests, les enseignants ont questionné les apprenants à propos de leur point de vue vis-à-vis de la RV. En effet, à cet instant de la réalisation du scénario, l'intérêt de la RV n'était encore pas clair pour le groupe de travail. Il a donc été intéressant de questionner les élèves directement, car comme l'a souligné une enseignante, ce n'est pas parce que les enseignants ne voient pas d'intérêt dans cette technologie qu'elle n'est finalement pas intéressante pour les élèves. Ne pouvons relativiser en indiquant que les élèves peuvent apprécier la RV sans que l'application atteigne ses objectifs, à savoir l'apprentissage. Il est intéressant de connaître les différents points de vue de manière à mieux appréhender les réactions de chaque utilisateur, qu'il soit enseignant ou apprenant. Il y a également le gap générationnel à prendre en compte, c'est-à-dire que les enseignants qui participent à l'écriture des activités pédagogiques peuvent ne pas avoir la même affinité avec la technologie que les apprenants qui vont utiliser l'application. Pour le Bac Pro Commerce, les enseignants, ne connaissaient pas la RV avant la mise en place de ce projet. Quant aux apprenants, ils peuvent avoir plus de pratiques avec le numérique en général ou même connaître la RV grâce aux plateformes de vidéo en ligne ou de streaming, mettant en scène des personnes utilisant la RV. Par conséquent, une interaction qui semble complexe à utiliser pour les enseignants peut se révéler plus facile à maîtriser pour les apprenants. La tablette virtuelle, par exemple, a semblé être au moment de la conception, être une interaction difficile à comprendre, alors que lors des prétests, les apprenants ont apprécié cette approche en raison du gain de temps qu'elle permet ainsi que la facilité d'utilisation. Par ailleurs, ce gap générationnel est visible dans la maîtrise des manettes du système. En effet, la compréhension des touches pour faire les interactions a posé de nombreux problèmes aux enseignants qui ont essayé la RV pendant les réunions de travail, et ce, même

après plusieurs sessions d'utilisation de la RV. Alors que lors de ces tests, les apprenants n'ont pas eu de problèmes dans la compréhension des touches.

À l'issue de chaque passage, nous avons questionné oralement les apprenants à propos de leur expérience avec la situation virtuelle. Certaines remarques à propos du monde virtuel ont montré l'intérêt de concevoir un environnement à la fois riche visuellement, mais également riche en contenu. En effet, le vide pose des problèmes aux élèves, qui sont habitués à des contextes professionnels où chaque mètre carré compte. Par conséquent, proposer un grand environnement, mais avec du contenu limité, suggère aux élèves une incohérence. De plus, l'ambiance sonore est très importante selon eux, car ils ont l'habitude de travailler dans un environnement où il y a constamment du bruit ou de la musique. La présence d'avatars virtuels qui endossent le rôle de clients a également été soulevée par certains élèves, bien que ceux qui ont effectué l'activité de réception ont trouvé l'avatar pas très pertinent, car il ne parle pas, ne regarde pas l'utilisateur dans les yeux et semble trop « artificiel ».

Les élèves ont souligné qu'en réel, ils ont parfois peur de se tromper, alors qu'en virtuel selon eux, se tromper n'est pas « grave » (George, 2011), car un redémarrage permet de remettre les éléments en ordre. Selon certains, cette peur de se tromper est également très présente en stage. Ces remarques concordent avec le retour d'expérience des enseignants à propos d'une certaine fébrilité de certains élèves à pratiquer sans appréhension les activités en stage.

6.1.5 Les apports de ces tests préliminaires

Le prétest nous a permis d'adapter la conception des différentes activités pédagogiques en fonction du retour des élèves. Guider l'apprenant apparaît approprié pour aider certains élèves à appréhender la situation pédagogique de même que l'EV. Cela peut s'effectuer en proposant une activité de démarrage, permettant ainsi à l'apprenant de repérer les lieux ou de maîtriser les interactions virtuelles tout en réalisant une activité pédagogique. Ou encore, cela peut être sous forme de tutoriel guidé, mais à la réalisation de ces prétests, la brique logicielle n'était pas encore implémentée. Bien que les activités possèdent une procédure nominale décrite par les enseignants, nous

avons remarqué que les élèves n'empruntent que très rarement ce déroulé type et des choix différents s'effectuent, tout en restant corrects d'un point de vue du métier ciblé. Cet élément justifie donc l'approche par indicateurs de performances à évaluer par l'enseignant et non une évaluation automatisée réalisée par le système.

Les prétests ont également montré comment des élèves utilisent la tablette virtuelle, car seuls les concepteurs et les enseignants avaient au préalable manipulé l'outil. Or il s'agit de la pierre angulaire de certaines activités et les interactions sur cet outil peuvent demander une habileté de sélection supérieure à toute autre interaction virtuelle. Dans cette version de la tablette virtuelle (Figure 6.4), les indications visuelles utilisent également une approche *flat-design*, à la nuance ici que très peu de textes sont présents. Cela a eu pour effet de perdre l'apprenant, qui n'a pas réussi à faire le lien entre les icônes et leurs significations. De plus, le manque de texte oblige les apprenants à passer un certain temps à explorer les menus et finalement à oublier la tâche principale. Nous avons par la suite de ce premier test choisi de refaire la structure de l'outil pour nous rapprocher d'un style visuel et interactif plus proche des tablettes classiques.

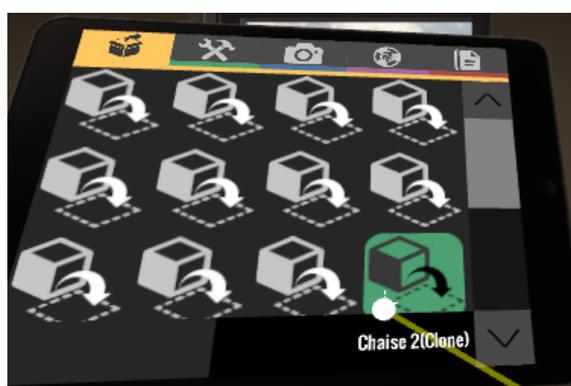


FIGURE 6.4 – Premier prototype de la tablette virtuelle ne prenant pas en compte le profil des élèves. Les applications comportaient très peu de texte, ce qui a eu pour effet de perdre les apprenants.

Un autre élément qui a été mis en avant lors de ces prétests est à propos des capacités de lecture des apprenants. Nous avons été confrontés à des apprenants qui peuvent avoir des difficultés à lire et à comprendre des textes longs et ces jeunes ont

également soulevé le fait que la police de caractère sur la tablette n'était parfois pas suffisamment lisible. Cela peut être lié à l'orientation de l'interface combinée à une absence de filtrage anisotropique⁴ sur les caractères, mais également à cause de la nature même de la police (*Roboto*⁵) qui est peu lisible sur la tablette virtuelle lorsque l'on utilise un visiocasque ou un CAVE. Nous avons par la suite corrigé ces problèmes en utilisant une approche vectorielle pour afficher le texte et également divers tests de police de caractère afin d'améliorer la lisibilité des textes sur la tablette virtuelle. Tout d'abord nous avons essayé une police spécialement conçue pour améliorer le confort de lecture des personnes dyslexiques (*OpenDyslexic*⁶). Cette police présente des différences d'épaisseur sur certains caractères, comme le « O » qui est plus épais à la base qu'en haut, de manière à être aisément reconnaissable. En virtuel ces différences d'épaisseurs combinées aux résolutions des casques rendent cette police difficilement utilisable, car les élèves peuvent confondre certaines lettres. En effet, les parties les plus fines des lettres sont rendues avec seulement quelques pixels, ce qui peut par exemple mener à confondre un « U » avec un « O » (Gac *et al.*, 2019). La présence de *serif* est également à éviter pour ces mêmes raisons de lisibilité sur la tablette. Notre choix s'est donc porté sur la police *Verdana*, qui a été préférée lors de tests de lisibilité réalisés chez DEC Industrie et au sein du LARIS.

6.2 Autres situations virtuelles implémentées

À la suite de la première itération de l'application du commerce, nous avons appliqué notre méthode de conception générique et de suivi de projet à deux autres projets.

6.2.1 Activités de pilotage de ligne de production

L'application de pilotage de ligne de production (PLP) peut être considérée en accord avec le chapitre précédent comme étant un projet de type Appel à Projets. C'est-

4. Filtre numérique appliqué sur une texture présente dans un espace 3D ayant pour but d'améliorer la qualité de l'image lors d'un rendu "oblique" https://en.wikipedia.org/wiki/Anisotropic_filtering

5. <https://fonts.google.com/specimen/Roboto>

6. <https://opendyslexic.org>



FIGURE 6.5 – Ligne de production virtuelle en fonctionnement. L'utilisateur est en train d'interagir sur le pupitre de la machine pour arrêter la production.

à-dire que le client, un centre de formation, souhaite digitaliser une ligne de production constituée de plusieurs machines industrielles existantes pour pouvoir faire manipuler cette dernière à des apprenants soit au sein du centre, soit dans le cadre de déplacements chez des partenaires industriels, pour faire de la formation continue. Le comportement souhaité de chaque machine se veut identique de son équivalent réel de manière à favoriser la transposition des compétences entre le réel et le virtuel. L'intérêt du virtuel ici est de rendre accessible des manipulations qui se réalisent habituellement sur une machine complexe et encombrante (Figure 6.5).

L'application comporte un mode nominal, un mode dégradé avec la présence d'une panne et une activité de changement de format. Ces activités ont été explicitées par le client sous forme de tableau détaillant les différentes étapes à réaliser dans le monde virtuel par l'apprenant (en annexe figure A.3), mis en œuvre par le client. Une seule réunion de travail a eu lieu pour analyser avec le client les différentes activités ainsi que valider la modélisation de l'EV. Concernant le choix nominal, nous avons procédé à une transposition du programme automate de la machine directement dans l'éditeur Unity3D. Le mode dégradé repose par exemple sur l'utilisation des éléments génériques et de quelques développements spécifiques comme un système de capteurs industriels, qui a été par la suite transformé en brique logicielle. Finalement, la procé-

de dure décrite est très proche du réel, et dans ce genre de cas, c'est au concepteur qu'il revient de réaliser en autonomie le séquençage et l'étayage du scénario pédagogique.

Pour que cette approche de conception fonctionne, le concepteur doit faire preuve d'un investissement plus important que dans le cas d'une conception en collaboration avec des enseignants. En effet, le concepteur doit s'appropriier les éléments clés du métier concerné pour que le scénario pédagogique puisse aboutir et être viable. Sans cet investissement de la part du concepteur, cette approche de conception peut être vouée à l'échec. Par conséquent, pour pouvoir parvenir à un résultat exploitable, il peut être approprié pour le concepteur de se faire conseiller par un professionnel du métier ou par des enseignants qui travaillent dans la filière concernée. Notamment afin de pouvoir assimiler les pratiques et finalités du métier. Par la suite, les différentes procédures et aléas peuvent être mis en place dans le monde virtuel, en accord avec la demande initiale du commanditaire. D'une manière générale, le concepteur peut se baser sur des situations réelles pour ensuite transcrire ces dernières dans le monde virtuel. Dans le cas du PLP, il s'agit par exemple de simuler des pannes sur les machines, et grâce aux variables didactiques, le concepteur peut préparer plusieurs aléas et situations spécifiques. La validation des choix du concepteur est ensuite effectuée par le commanditaire au cours d'une réunion de travail.

Grâce aux briques logicielles, des prototypes intermédiaires ont pu être réalisés rapidement, permettant d'optimiser le processus de validation par le client. Le module des variables didactiques permet également au concepteur de prévoir plusieurs cas d'usages autour de la problématique posée par le cahier des charges. L'enseignant peut par la suite choisir les cas d'usage qu'il préfère en fonction de la situation pédagogique. Dans le cas de ce projet, une panne sur un capteur d'entrée a été demandée. Grâce à l'approche générique, nous avons conçu un comportement générique de capteur industriel qui autorise l'enseignant à choisir non pas un, mais un ensemble de capteurs sur la machine pour cette activité de panne. La transposition réaliste du comportement de la machine, combinée à une approche générique permet de reproduire fidèlement des aléas réels sans programmation supplémentaire. L'intérêt est double, tout d'abord pour le concepteur, qui met en place du code moins complexe et plus facilement maintenable, mais également pour l'enseignant, qui possède une machine

virtuelle qui se comporte exactement de la même manière que son équivalent réel.

6.2.2 Application de revue de chantier



FIGURE 6.6 – Constatation d'un défaut lors de la revue de chantier. L'apprenant doit prendre une photographie du problème constaté à l'aide de la tablette virtuelle.

Vers la fin de ces travaux de thèse, nous avons élaboré une application de formation qui suit l'approche par groupe de travail détaillée dans le chapitre précédent. Le scénario pédagogique de ce projet porte sur une revue de chantier, où un apprenant endosse le rôle de « chef » et doit aller contrôler l'état d'avancement du chantier. Cette tâche pédagogique a été pensée par un inspecteur académique, nous avons par la suite été conviés à rédiger avec lui le déroulé complet de l'activité. Chaque étape a donc été formalisée sur papier et, grâce aux autres applications développées, nous avons pu tester certaines interactions pour valider l'essentiel des étapes du scénario de revue de chantier avant même de terminer l'écriture du scénario. La capitalisation des résultats des autres applications nous a permis d'écrire rapidement le scénario et de mettre en place ce dernier grâce aux briques logicielles en deux semaines. Les tests ont également été accélérés, car les interactions 3D sont les mêmes que pour les autres applications virtuelles proposées pour cette filière. Ce qui a minimisé le temps d'apprentissage de l'outil par les enseignants qui ont procédé aux validations inter-

médières. En effet, ces derniers ont déjà utilisé d'autres EVAH utilisant nos briques logicielles, de ce fait la navigation, la sélection ou encore la tablette virtuelle sont déjà maîtrisés.

Ce projet nous a permis de mettre plus précisément en pratique les éléments capitalisés depuis le début de ces travaux de thèse. Nous avons constaté que plus le dialogue est clair et accompagné d'exemples tangibles, plus la conception du scénario est rapide et efficace. Le concepteur et l'enseignant (pour ce projet il s'agit d'un inspecteur académique) doivent être capables de se projeter instantanément mentalement dans l'EV après chaque proposition d'amélioration du scénario pédagogique. Par exemple le concepteur peut proposer l'utilisation des consignes à cocher au lieu de l'utilisation d'un document complexe de revue de chantier. Ou alors cela peut être la visualisation du plan du chantier sur la tablette afin de remplacer un plan papier, qui est difficilement réalisable en virtuel.

6.3 Évaluation du scénario Bac Pro Commerce

L'application basée sur le référentiel du Bac Pro Commerce a été évaluée dans cinq lycées de l'académie de Nantes auprès de 38 apprenants et de 16 enseignants. Nous allons dans cette section, détailler cette expérimentation et discuter les résultats obtenus à travers des données enregistrées et d'avis subjectifs recueillis à l'aide de questionnaires (en annexe D).

6.3.1 Objectifs

En plus d'évaluer les choix techniques et approches de conception, cette expérimentation a pour but principal de tester les deux méthodes permettant l'évaluation, à savoir l'entretien d'explicitation à l'aide des traces (débriefing, noté DB) et l'évaluation pendant que l'élève réalise la tâche grâce au mode de tutorat synchrone, aussi appelé *évaluation en temps réel* (RT). Bien que des prétests d'utilisabilité aient été réalisés, ces derniers ne portaient pas sur l'exploitation pédagogique concrète avec les élèves et avaient plus pour objectif de guider la phase de conception tout en observant l'utilisa-

bilité de l'outil auprès des apprenants de la filière Commerce. Les objectifs principaux de cette expérimentation sont les suivants :

- Tester deux approches d'évaluation (DB et TR). Bien qu'elles puissent être complémentaires, nous pensons que l'entretien d'explicitation sera privilégié par les enseignants pour une utilisation sur le terrain (ex. : contraintes d'effectifs, gestion de la classe, facilité de mise en place).
- Analyser le niveau d'autonomie des élèves (réalisation de la tâche et appropriation de l'outil virtuel/interactions 3D).
- Vérifier la compréhension de l'étayage (tablette, déplacement d'objets).
- Vérifier si l'activité de mise en rayon virtuelle est réalisable par les différents profils d'apprenants présents dans la filière Commerce (classes, établissements, expérience professionnelle).
- Identifier les éléments problématiques dans la compréhension du contexte pédagogique simulé en virtuel (notamment la compréhension des consignes / instructions).

Nous formulons donc l'hypothèse principale que l'exploitation des indicateurs de performance post-virtuel (sous-section 5.3.3) grâce à un entretien d'explicitation, permet une évaluation plus précise de l'apprenant et un support pédagogique plus pertinent que l'observation en temps réel. Plusieurs éléments nous font soutenir cette hypothèse. Tout d'abord, parce que l'entretien d'explicitation peut être exécuté plus tard, après la session virtuelle, autorisant ainsi l'élève à effectuer l'activité virtuelle en autonomie, permettant ainsi à l'enseignant de s'occuper du reste de la classe. Contrairement à l'observation en temps réel qui oblige l'enseignant d'être physiquement proche de l'apprenant et de maîtriser l'outil de tutorat synchrone. La mobilisation de l'enseignant pendant la session virtuelle est selon nous problématique. En effet, pendant l'observation en temps réel il faut pouvoir gérer le reste de la classe, alors que l'exploitation du rapport d'activité peut être faite dans un second temps. Par ailleurs, nous mettons en avant cette hypothèse, car le système peut saisir des actions et instants

peu perceptibles par l'humain. Par exemple en cas d'une mauvaise manipulation de l'écran du poste de tutorat, l'observateur peut manquer un détail important. Alors que le système peut capturer cet instant et le transcrire sur le rapport d'activité. Il est envisageable de faire remonter cette information en temps réel à l'enseignant sur l'écran du poste de tutorat, auquel cas, pendant l'observation, l'enseignant peut avoir accès à l'état des réalisations. Néanmoins cette pratique n'est pas généralisable, car pour certaines activités, des tâches ne observables par le système qu'en fin d'activité, surtout dans des activités moins linéaires comme dans le cas du Commerce où l'apprenant peut réaliser certaines étapes dans l'ordre qu'il le souhaite.

En plus de cette hypothèse, cette expérimentation est également utilisée par les enseignants pour avoir un retour précis et concret de l'outil en conditions réelles. Ces derniers souhaitent se projeter et voir comment la RV peut être utilisée par les élèves et comment mettre cela en place concrètement. Nous cherchons donc également à observer le temps d'adaptation des élèves vis-à-vis de l'outil, l'utilisation des fonctions du poste de tutorat synchrone, ainsi que la récupération des données numériques.

La tablette est également au cœur des interrogations, car elle constitue une simplification importante des interactions 3D. Par ailleurs les raccourcis proposés par la tablette sont compréhensibles pour les concepteurs et les enseignants, mais nous ne savons pas comment les élèves vont appréhender cette approche. Nous faisons l'hypothèse que les élèves vont trouver la tablette utile et vont réussir à l'utiliser rapidement grâce à notre choix de design minimaliste accompagné d'icônes proches des équivalents présents sur les smartphones. Si cette modalité d'étayage est pertinente, alors il peut être envisageable d'adopter cette approche pour d'autres outils virtuels dans d'autres contextes pédagogiques.

Avec cette expérimentation, nous souhaitons également étudier le degré d'autonomie des élèves lors de l'utilisation d'une activité sans guidance. Enfin, nous voulons également vérifier que l'activité choisie pour cette expérimentation corresponde bien aux différentes classes d'apprenants présentes dans la formation professionnelle (CAP, Seconde, Première, Terminale) de même qu'aux différentes expériences professionnelles vécues par les participants. C'est pourquoi certains profils spécifiques ont été sélectionnés par les enseignants, par exemple des élèves qui ont déjà effectué ce

genre d'activité dans un magasin similaire en stage. Les hypothèses à vérifier dans cette expérimentation sont par conséquent les suivantes :

- **H0** : L'entretien d'explicitation a posteriori est préféré par les enseignants plutôt que l'observation de l'apprenant en temps réel. Nous pensons que cette préférence est à la fois d'ordre pratique, en raison du fait que le débriefing peut être fait sans le poste de RV, de même que pédagogique, car le dialogue et la prise de recul par l'apprenant peuvent être bénéfiques sur le plan pédagogique. De plus, l'apprenant n'est pas en immersion, ce qui peut favoriser les échanges et réduire les distractions potentielles.
- **H1** : Il n'y a pas de différence dans les usages de l'outil virtuel entre les différentes classes.
- **H2** : Il n'y a pas de différence dans les usages de l'outil virtuel entre les différents établissements.
- **H3** : Les apprenants de haut niveau (Terminale) réussissent mieux la tâche que les apprenants novices (Secondes, CAP). Notamment en raison des expériences professionnelles plus nombreuses ainsi que la quantité de connaissances plus importante, en théorie, pour les apprenants de T^{ales}.
- **H4** : Les apprenants de haut niveau sont plus rapides que les autres ($T^{\text{ales}} > 1^{\text{ères}} > 2^{\text{ndes}} > \text{CAP}$).
- **H5** : Les apprenants ont réussi à interagir sur les différentes interfaces de la tablette virtuelle.
- **H6** : La téléportation ne cause pas de cybermalaises.

6.3.2 Population de l'expérimentation

Pour cette expérimentation, nous avons mobilisé des enseignants et des élèves de cinq lycées de l'académie de Nantes comme l'indique le tableau 6.2. Les apprenants qui ont participé à ces tests sont issus de classes différentes. Nous avons eu 4 élèves de CAP ECMS, 7 élèves de Seconde Bac Pro Commerce/Vente, 18 élèves de Première Bac Pro Commerce/Vente et 8 élèves de Terminale Bac Pro Commerce/Vente.

La prédominance des élèves de première s'explique, car certains élèves de terminale et de seconde étaient en stage. L'emploi du temps des élèves a donc déterminé

Établissement	Date	Nombre d'élèves	Nombre d'enseignants
Lycée Le Mans Sud (Le Mans, Sarthe)	16 Mai 2019	12	5
Lycée Ludovic Ménard (Trélazé, Maine et Loire)	17 Mai 2019	6	2
Lycée D'Estournelles De Constant (La Flèche, Sarthe)	23 Mai 2019	8	4
Lycée Paul Emile Victor (Avrillé, Maine et Loire)	24 Mai 2019	6	2
Lycée Europe (Cholet, Maine et Loire)	06 Juin 2019	6	3
TOTAL		38	16

TABLEAU 6.2 – Participants à l'expérimentation.

quels apprenants pouvaient participer aux tests sans que ce soit pénalisant pour eux. De plus, la mise en place de cette expérimentation a pris plusieurs mois le temps de mobiliser les ressources humaines adéquates. Le choix des élèves a été effectué par les enseignants en fonction des différents profils des apprenants et également en fonction des attentes des équipes pédagogiques vis-à-vis de l'expérimentation. C'est pour quoi nous avons eu l'opportunité de mettre en situation des apprenants ayant des profils très différents comme des élèves très à l'aise dans le système scolaire ou des élèves plus en difficultés, notamment vis-à-vis des apprentissages (ex. : problèmes de motivation, troubles de la lecture ou du comportement).

L'autre partie des apprenants sont des volontaires sélectionnés par les enseignants. Avoir une population hétérogène est pertinent dans notre cas d'étude, car la formation professionnelle est riche de sa diversité de profils. Il convient donc de faire des tests en prenant en compte un maximum de profils différents de manière à s'assurer qu'aucun profil ne se retrouve lésé en présence de la RV. S'assurer de cela est également important pour les équipes enseignantes, qui apportent une attention particulière au fait que cette technologie puisse être utilisée par tous.

Les enseignants mobilisés enseignent tous dans la filière Commerce et cinq d'entre eux ont participé à la conception des activités du magasin virtuel. Cela a permis à ces derniers de participer du début à la fin du processus de conception. Lors de ces expérimentations, nous avons mobilisé 16 enseignants, nous justifions cette quantité en raison des contraintes de certains d'entre eux, qui n'ont pas pu participer à l'intégralité des demi-journées. De ce fait, certains enseignants n'ont participé à l'évaluation que de deux ou quatre apprenants. Cette diversité nous a également permis d'avoir plus de retours subjectifs de la part des enseignants.

6.3.3 Création de la situation expérimentale

La tâche expérimentale repose sur une activité de mise en rayon. Il s'agit de la première version de l'application et les résultats de cette expérimentation ont pour objectif de vérifier la pertinence de l'activité auprès des apprenants et des enseignants. Nous avons apporté une attention particulière à l'optimisation des performances du monde virtuel. En effet, nous souhaitons garantir un nombre d'images par seconde constant à 90Hz de manière à rendre la situation virtuelle la plus agréable possible visuellement et éviter les cybermalaises potentiels (Martirosov et Kopecek, 2017). Il s'agit là d'une remarque qui a été formulée par quelques apprenants qui ont trouvé les baisses de taux de rafraîchissement dans certains endroits du magasin comme étant « *étrange, perturbant, source de cybermalaise* » lors des prétests. Les consignes de l'activité ont été validées au préalable par les enseignants afin de s'assurer que les tournures de phrases soient compréhensibles par les apprenants :

*Vous devez **remplacer** une ancienne promotion par une opération de mise en valeur de la **nouvelle collection**. Rendez-vous auprès de la **tête de gondole en surbrillance** afin d'observer la disposition actuelle du mobilier. Les nouveaux produits se trouvent **dans la réserve sur une palette au sol**. Une fois l'implantation réalisée, vous devrez déposer les éléments (cartons de produits, PLV, ...) de **l'ancienne promotion en réserve dans le rack "En attente"**.*

Des instructions complémentaires sont données à l'oral par l'expérimentateur (l'auteur de ce manuscrit) en début d'activité concernant la tablette virtuelle, les commandes des manettes ainsi que d'autres détails d'utilisabilité. Les enseignants ont également profité de cet instant pour expliquer les objectifs pédagogiques de manière à rendre ce temps d'expérimentation également utile pédagogiquement pour les élèves. Cette situation est sans guidance, car nous souhaitons voir si les élèves arrivent à utiliser ce nouvel outil sans instructions précises à chaque étape. En effet, les enseignants ont souligné le fait que s'il y a de la guidance, plusieurs sessions d'utilisation peuvent être nécessaires, ce qui peut s'avérer complexe à mettre en place dans certains établissements. Nous choisissons ici de qualifier ce contexte comme étant le « *pire* » envisageable, c'est-à-dire que l'apprenant n'a pas préparé la session pédagogique, il ne connaît pas l'environnement ni l'équipement. De plus, les enseignants ne savent également pas comment appréhender l'outil par manque d'expérience. Cette situation correspond aux premiers usages d'un nouvel outil pédagogique, que ce soit pour une

maquette ou une application virtuelle.

La procédure à réaliser par l'apprenant est détaillée dans la figure 6.7 (en annexe tableau B)⁷. Il s'agit d'une représentation du cas idéal, mais le participant peut réaliser certaines tâches avant d'autres, faire des omissions ou même des erreurs. La temporalité de l'activité est en théorie de 20 minutes, mais nous estimons que ce temps sera plutôt de l'ordre de 30 à 40 minutes en raison du temps d'apprentissage des interactions et de la prise de repères spatiaux dans l'EV. L'équipement utilisé consiste en deux stations de RV réparties dans deux salles, utilisant comme visiocasque le HTC Vive.

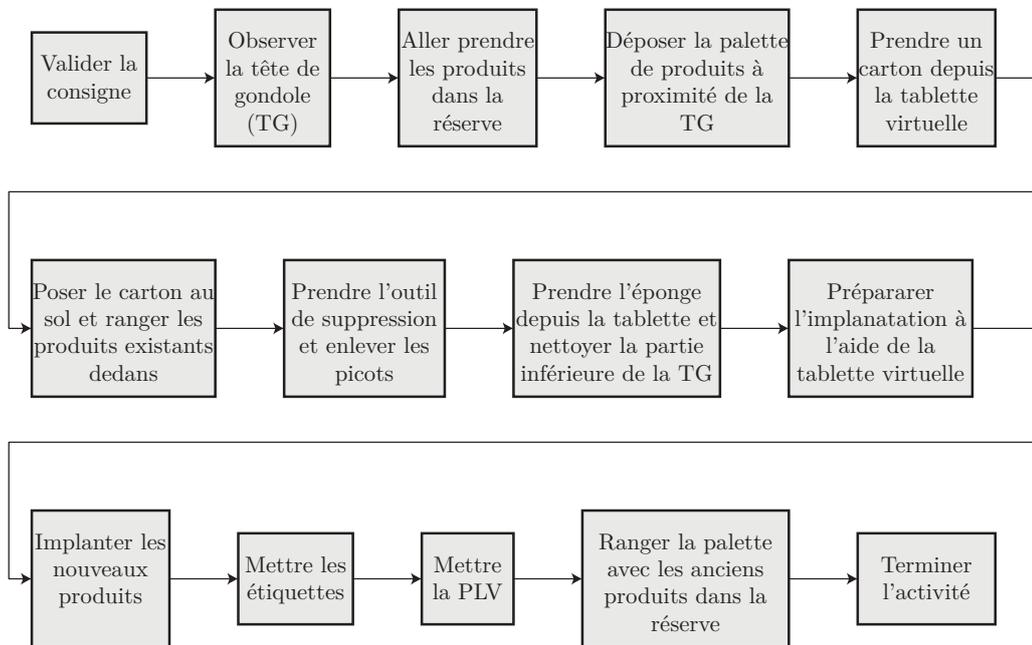


FIGURE 6.7 – Organisation possible des tâches réalisables par apprenant pendant l'expérimentation. Il s'agit d'une approche possible parmi d'autres. Ce séquençement a été validé par les enseignants comme étant le « *cas idéal de réalisation* ».

Habituellement pour une activité sans RV, la méthode d'évaluation repose sur l'utilisation de grilles qui peuvent par la suite être saisies informatiquement dans les logiciels de gestion des compétences des élèves. Les enseignants ont donc créé une grille leur permettant de synthétiser et d'évaluer la réalisation de l'élève (Tableau 6.3). Cette grille

7. Une vidéo explicative détaille également une réalisation possible de l'activité : https://drive.google.com/file/d/1ARhguYFkDZaZy6Fa72krxM_EnNXL6tds/view?usp=sharing

Intitulé	Indicateurs			
Planter les produits selon une logique commerciale	Pas de logique repérable dans l'implantation réalisée	Une logique commerciale est repérable mais non adaptée à la situation	Une logique commerciale est repérable et partiellement adaptée à la situation	La logique d'implantation retenue est tout à fait pertinente
Vérifier l'étiquetage, le balisage	Aucune vérification n'est pas réalisée	Vérification d'un élément	Vérification des deux éléments sans modification	Vérification des deux éléments avec modifications si besoin
S'assurer de la propreté du rayon	L'élève n'a pas prêté attention à la propreté du rayon	L'élève a observé le rayon sans le nettoyer	L'élève a partiellement nettoyé le rayon	L'élève a parfaitement nettoyé le rayon avant l'implantation
Mettre en place la signalétique	Pas de signalétique installée	Une signalétique installée mais non adaptée	Une signalétique est installée mais partiellement adaptée	La bonne signalétique est installée au bon endroit
Aménager le rayon	L'aménagement global n'est pas cohérent	L'aménagement du rayon est partiellement cohérent	L'aménagement du rayon est cohérent, mais perfectible	L'aménagement du rayon est très cohérent
Veiller au respect des règles d'hygiène et de sécurité	Les règles d'hygiène et de sécurité ne sont pas respectées	Les règles d'hygiène et de sécurité sont partiellement respectées	Les règles d'hygiène et de sécurité sont respectées	Les règles d'hygiène et de sécurité sont respectées et l'élève les anticipe (repérage des dangers...)
Autonomie : dans la prise en main de la RV	Autonomie très lente	Difficultés au démarrage puis autonomie ensuite		Autonome directement
Ranger l'ancienne promotion en suivant la consigne	L'ancienne promotion n'a pas été rangée correctement	L'ancienne promotion a été déposée au sol	L'ancienne promotion a été rangée dans un rack	L'ancienne promotion a été rangée dans le bon rack
La méthodologie / logique mise en place lors de cette activité est visible	Pas du tout			Tout à fait d'accord

TABLEAU 6.3 – Grille d'évaluation conçue par les enseignants pour cette expérimentation.

a été utilisée pour l'évaluation pendant la réalisation (TR) et également après la session virtuelle (DB), de manière à comparer les éléments évalués en TR et en DB à l'aide des indicateurs de performance. L'autre intérêt de l'utilisation de la grille est pour les enseignants d'explorer de nouvelles méthodes d'intégration de la RV en formation.

6.3.4 Réalisation des expérimentations

L'expérimentation comporte deux sessions en parallèle. Nous souhaitons que chaque enseignant puisse procéder à l'évaluation par l'observation dite « *en temps réel* » et par l'exploitation des traces numériques a posteriori, à savoir, l'entretien d'explication. Étant données les contraintes de chacun, nous ne pouvons pas monopoliser plusieurs jours des enseignants pour effectuer des tests, d'autant plus que cette période de

l'année comporte des visites de stage, des sessions de contrôle continu, ainsi que la préparation des épreuves du BAC ou encore, cas exceptionnel ici, la préparation de l'application du nouveau référentiel pour la rentrée de 2019. Nous avons donc fait le choix de mettre en place deux sessions en parallèle.

Chaque session a une temporalité de l'ordre de 30 à 40 minutes dans le monde virtuel. Ce temps comprend également le remplissage d'un questionnaire par l'apprenant, après la session virtuelle et quinze minutes allouée à un entretien d'explicitation entre l'apprenant et l'enseignant (Figure 6.8). Une session implique un apprenant et un enseignant. Pendant que l'apprenant effectue son activité dans l'EV, l'enseignant utilise le module de tutorat synchrone (sous-section 4.2.5) pour effectuer l'évaluation de l'apprenant. Dès que la session est terminée, l'apprenant peut échanger avec l'enseignant à propos de la tâche pédagogique. Puis les enseignants changent respectivement de salle pour procéder au débriefing de la session qu'ils n'ont pas observé. L'exploitation des traces est réalisée au cours d'un entretien d'explicitation. À l'issue de la journée ou demi-journée d'expérimentations, les enseignants ont été invités à remplir un questionnaire à propos de la simulation et des modalités d'exploitation pédagogique.

Fonctionner en parallèle permet de mobiliser efficacement les enseignants. À l'issue de la journée ou demi-journée d'expérimentation dans un établissement, un débriefing a été conduit avec les enseignants pour avoir leur ressenti vis-à-vis de l'utilisation de la RV par les élèves, de la pertinence de l'outil ou encore des modalités d'exploitation. Un questionnaire est également rempli par les enseignants à l'issue de l'expérimentation (en annexe E). Les données récupérées au cours de cette expérimentation sont donc les suivantes :

- Rapport d'activité comprenant les indicateurs de performances décrits dans la sous-section 5.3.3.
- Données brutes (JSON) (Listing 3).
- Capture vidéo du point de vue de l'utilisateur (utilisée pour l'évaluation TR).
- Captures d'écran automatique ou issue de la tablette virtuelle.
- Questionnaire apprenant / enseignant.
- Grille d'évaluation des compétences remplie par l'enseignant.

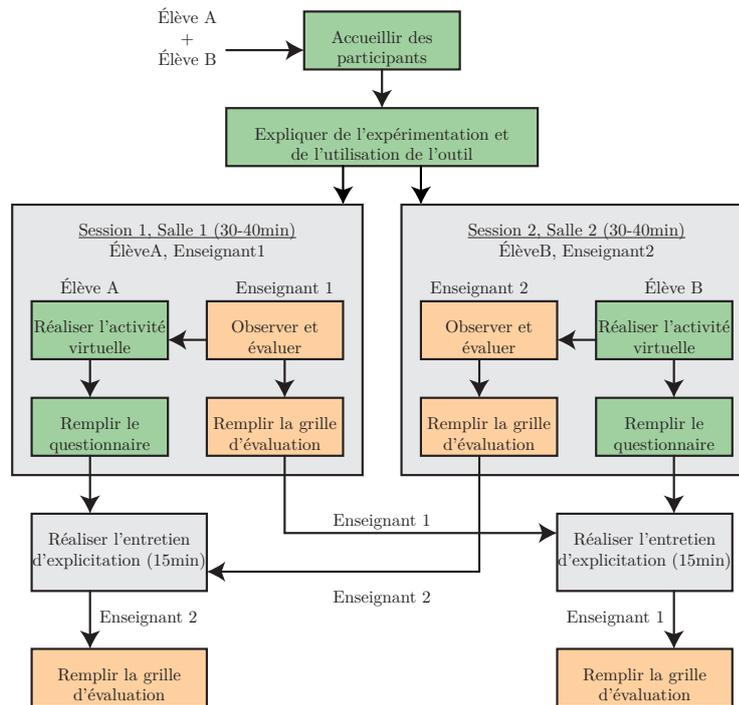


FIGURE 6.8 – Représentation schématique de la procédure de l'expérimentation.

Nous précisons que sur les 38 apprenants participants à l'expérimentation, un d'entre eux n'a pas pu terminer l'activité pédagogique en raison d'un problème technique. L'apprenant avait déjà effectué la mise en rayon et il ne lui restait plus qu'à ranger le matériel dans la réserve. En raison de ce problème technique, les traces n'ont pas pu être générées. Un autre apprenant n'a pas réussi à terminer l'activité en raison d'importants problèmes à propos de la compréhension de la consigne, de l'activité ainsi que dans l'utilisation des manettes. Nous avons donc pris la décision d'arrêter la session virtuelle au bout de 42 minutes afin de pouvoir procéder à l'entretien d'explicitation. De plus, nous avons dû aider ce participant à remplir le questionnaire en raison de problème de compréhension de ce dernier. Ces deux participants n'entrent pas dans l'analyse statistique des traces numériques. En revanche, ils ont répondu au questionnaire post virtuel et ont également participé à un entretien d'explicitation. Concernant le questionnaire, un participant n'a pas pu répondre à ce dernier, en raison d'un impératif d'emploi du temps.

6.4 Résultats

Les résultats de cette expérimentation se classent en deux volets. Le premier concerne l'exploitation des traces des apprenants afin de valider les implémentations comme la tablette virtuelle ou l'étayage. Le second volet développé dans cette section est à propos des techniques d'évaluation et d'utilisation de l'outil selon le point de vue des enseignants. Le but est de valider ou non l'hypothèse concernant l'exploitation du rapport d'activité.

6.4.1 Analyse des traces

Une base de données a été construite en prenant en compte les traces numériques et les résultats du questionnaire des apprenants. Les traces numériques sont au format JSON (Listing 3) et reposent sur un module générique d'observation de l'EV. Plusieurs variables sont développées dans ce fichier :

- **Données de navigation.** Les événements de téléportation sont consignés dans cette catégorie, trois types de déplacement sont décrits, *SUCCESS* dans le cas d'une téléportation correcte, *IN_PROGRESS* si l'utilisateur a relâché le bouton avant que le temps d'attente ne soit terminé et *FAIL* lorsque le bouton de téléportation est relâché alors que la téléportation n'est pas autorisée. Chaque entrée est accompagnée de données de distance et de temps propre à chaque événement.
- **Données d'interactions 3D.** Les interactions sont divisées en deux groupes, celles qui concernent les événements de manipulation (changement d'outil (*Device*, sous-section 4.2.1), déplacement d'objets, etc.) et celles qui décrivent l'état de la sélection (*raycast*). Plusieurs événements de *raycast* sont possibles : *ENTER* lorsque le rayon entre sur un objet, *EXIT* lorsque le rayon quitte un objet interactif ou encore *CLICK_STAY* lorsque qu'un bouton de la manette est activé. Lorsque l'utilisateur clique dans le vide, sans pointer un objet interactif, l'événement *CLICK_NULL* est consigné dans le fichier de données. Ces événements sont accompagnés de données temporelles de même que des informations sur l'état des boutons.

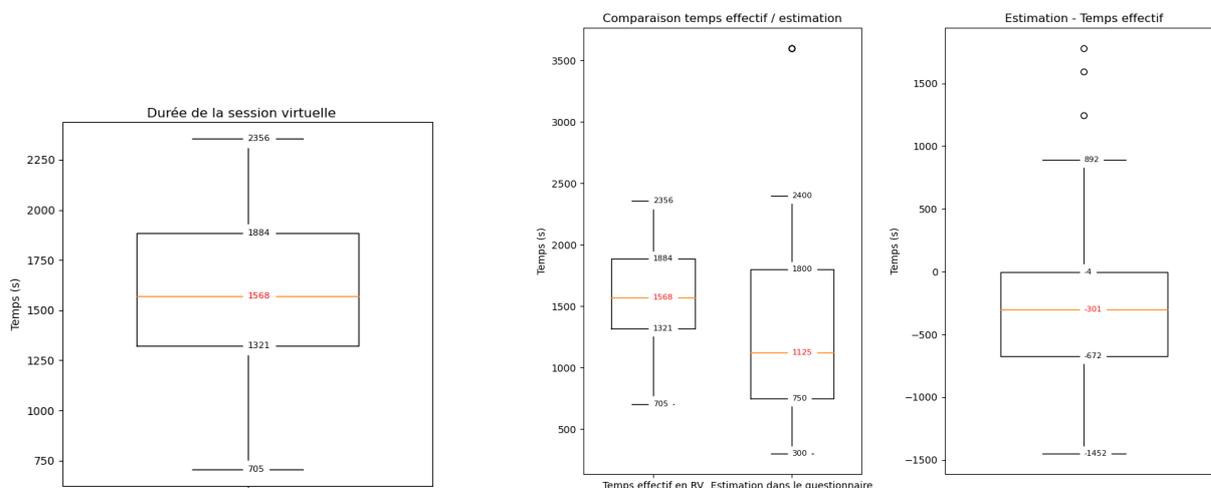
- **Données de la tablette virtuelle.** Cette catégorie regroupe les choix (via le *ray-cast* de sélection) effectués sur la tablette virtuelle. Grâce à cela, nous pouvons déterminer s'il s'agit d'un clic sur un élément interactif ou non. Nous avons également des informations sur l'application en cours d'utilisation de la tablette.

6.4.2 Étude des facteurs temporels

La première variable d'intérêt est le temps. Dans l'ensemble, les élèves ont mis en moyenne 26 minutes pour compléter l'activité de mise en rayon (std=7min. 30sec.) (Figure 6.9a). Nous rappelons qu'il s'agit d'une situation sans préparation et que les élèves utilisent l'outil pour la première fois. Par conséquent une partie de ce temps de complétion peut correspondre à l'appropriation des touches, des interactions 3D ou encore de l'EV. Nous n'avons cependant pas de moyen automatisé pour quantifier ce temps d'appropriation de l'outil, et demander aux apprenants une estimation du temps peut se révéler peu fiable. De plus, même en utilisant les captures vidéos, il est complexe de déterminer l'instant où l'on peut considérer que l'apprenant maîtrise les interactions 3D. Comme l'atteste la comparaison entre le temps total effectif et l'estimation demandée dans le questionnaire (Figure 6.9b). Et les élèves ont tendance à sous-estimer le temps passé en EV.

Par exemple, un apprenant n'a pas renseigné de temps et a indiqué à la place « *Je ne sais pas, j'avais l'impression d'être dans une bulle* ». Cela peut s'expliquer par la sensation de *flow* qui s'est installée chez les apprenants et qui a été amplifiée par l'effet de « *nouveauté* » prodigué par le casque de RV.

Par ailleurs sur les trente-sept répondants au questionnaire, vingt-cinq participants ont indiqué utiliser la RV pour la première fois lors de cette expérimentation. Ainsi, en plus du temps d'adaptation à l'application et à la situation pédagogique, la plupart des utilisateurs ont découvert le port du casque, les manettes, ainsi que les sensations que la RV peut offrir. Plusieurs stratégies de découverte de fonctionnalités ont été observées. Soit l'apprenant effectue plusieurs fois la nouvelle interaction pour la maîtriser, soit il effectue cette dernière plus lentement, par exemple en observant avec plus d'at-



(a) Temps total mis par les participants pour terminer l'activité virtuelle.

(b) Comparaison entre le temps effectif et estimé de la session virtuelle.

FIGURE 6.9 – Données temporelles de la session virtuelle ($n = 36$).

tention un objet en cours de déplacement ou en essayant de le poser à des endroits non autorisés.

Concernant la répartition de ce temps pendant l'activité, nous pouvons isoler plusieurs situations types :

- **La navigation.** Il s'agit du temps pendant lequel la téléportation a été activée, quel qu'en soit le résultat.
- **Le temps de sélection.** Il s'agit des instants pendant lesquels l'utilisateur a pointé un objet interactif. Cela peut être intentionnel ou non. Cette donnée ne contient pas les durées d'interactions de la tablette virtuelle.
- **L'utilisation de la tablette.** Il s'agit du temps passé à interagir sur la tablette virtuelle. Nous précisons que ce temps ne prend en compte que le temps où le raycast de l'utilisateur touche la tablette. Nous n'avons pas de moyen pour quantifier précisément le temps de lecture sur la tablette virtuelle.
- Les autres durées correspondent aux temps n'entrant pas dans les catégories précédentes. Il s'agit essentiellement d'instant où l'utilisateur observe l'EV sans pointer un objet en particulier. Cela correspond également aux instants entre deux interactions où l'utilisateur doit effectuer un mouvement pour passer d'un

objet A vers un objet B.

Comme le montre la figure 6.10, les élèves allouent comparativement aux autres interactions un temps plus court à la navigation au cours d'une session virtuelle. Les interactions sur la tablette représentent un temps non négligeable, c'est pourquoi nous avons décidé dans cette analyse de distinguer cette sélection des autres. Ces dernières correspondent majoritairement, dans cette activité virtuelle, à la sélection d'objets déplaçables, tels que les produits à mettre en rayon ou les cartons.

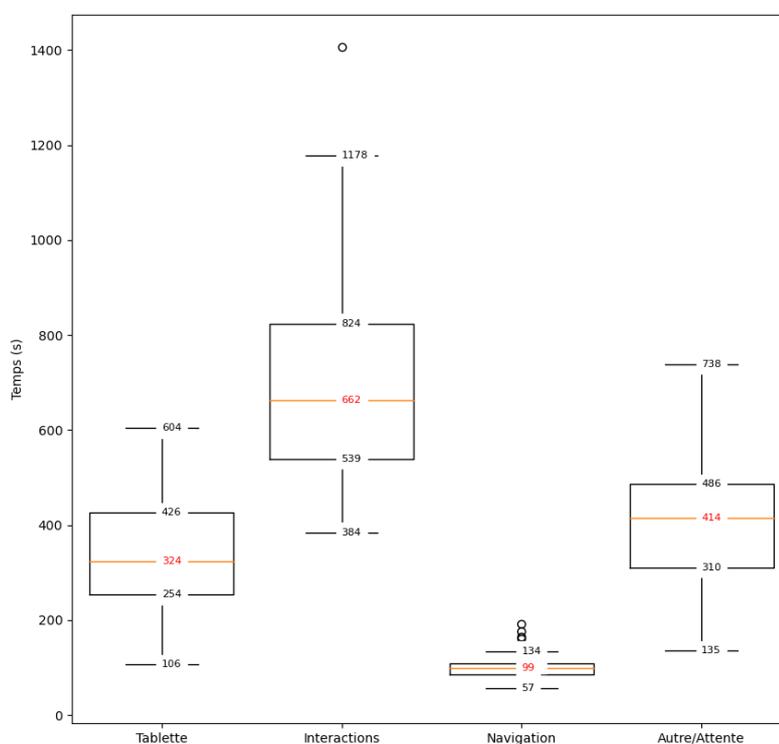


FIGURE 6.10 – Répartition des temps en fonction du type d'interaction ($n = 36$).

Pour valider ou non l'hypothèse **H4** (*Les apprenants de haut niveau sont plus rapides que les autres* ($T_{ales} > 1^{ères} > 2^{ndes} > CAP$)), nous avons effectué une Classification Ascendante Hiérarchique (*Hierarchical Cluster Analysis, HCA*) en utilisant comme unique critère le temps total de réalisation de la tâche (Figure 6.11). Deux groupes ($T1$ et $T2$) sont mis en avant dans cette analyse comme le détaille le tableau 6.4.

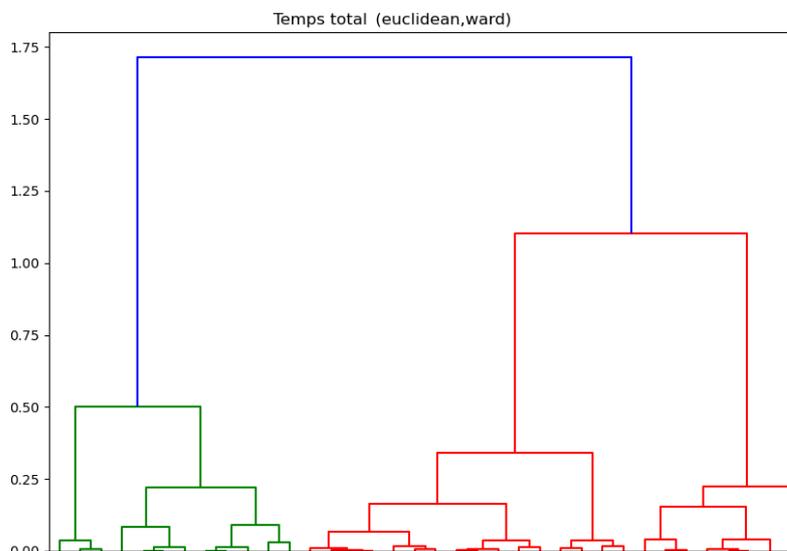


FIGURE 6.11 – Classification des participants selon le temps passé dans le monde virtuel.

Groupe	Nombre de participants	CAP	2 ^{ndes}	1 ^{ères}	T ^{ales}	Caractéristique du groupe
T1	12	2	1	8	1	Plus lent
T2	24	2	5	11	6	Plus rapide

TABLEAU 6.4 – Groupes de participants classés selon le temps total passé dans le monde virtuel. Compte tenu des aléas expérimentaux, seuls 36 participants ont terminé l'activité et présentent des traces exploitables pour cette analyse.

Au regard de ces résultats, nous ne sommes pas en mesure de valider clairement l'hypothèse **H4** (*Les apprenants de haut niveau sont plus rapides que les autres (T^{ales} > 1^{ères} > 2^{ndes} > CAP)*). Il peut être approprié de conduire d'autres expérimentations avec ces mêmes apprenants, afin d'éliminer le temps de maîtrise de l'outil virtuel, la découverte de l'EV ou encore les interactions. Auquel cas, cela peut probablement influencer l'hypothèse **H4**.

Néanmoins, la rapidité ne signifie pas une meilleure réussite, or cette notion de réussite peut être extraite à l'aide des scores des apprenants lors de l'évaluation par les enseignants à l'aide de la grille. Nous pouvons également rajouter les données subjectives du questionnaire, notamment la question « *Je pense avoir bien réussi l'activité* ». Pour ce faire, nous avons effectué un test de Mann-Whitney sur les scores des deux groupes aux évaluations en temps réel et débriefing. Seul l'indicateur sept

à propos de l'autonomie à l'utilisation de l'outil est significatif ($U = 53.5$ $p = 0.0318$), où les utilisateurs du groupe $T1$ ont un score plus bas. Cela correspond à un profil d'utilisateurs qui met plus de temps à utiliser les outils virtuels en raison d'une prise en main plus longue que les participants du groupe $T2$.

Par ailleurs, certains apprenants sont lents, car dans le cas de l'activité de mise en rayon, ils peuvent prendre le temps de placer précisément les objets tout en réussissant correctement l'activité, alors que d'autres, également lents, peuvent être en difficulté. Pour cette activité, nous ne sommes pas en mesure de différencier un apprenant en difficulté d'un apprenant minutieux (qui prend son temps pour réaliser avec un haut degré de précision l'activité pédagogique), en considérant uniquement les traces numériques.

6.4.3 Stratégies de navigation dans l'EV

Concernant la navigation, les utilisateurs effectuent finalement très peu d'erreurs de téléportation (TP_FAIL) (Figure 6.12) compte tenu du contexte où ils découvrent l'EV de même que la technique de navigation. En effet, les participants ont trouvé la téléportation facile à utiliser et efficace. Cependant, certains d'entre eux ont indiqué avoir ressenti « *du mal être* » (cybermalaises) (Tableau 6.5). En particulier, le participant numéro 8 a indiqué éprouver des cybermalaises (l'unique score de 5), et nous avons observé pendant la session que ce dernier n'a pas réussi à s'immerger complètement dans le monde virtuel. En revanche, le participant a gardé le casque de RV et a réussi à terminer l'activité sans aucun problème autre que les cybermalaises et le manque d'immersion. Ce dernier point était également accompagné de réactions excessives comme un fort étonnement ou un dépassement fréquent des limites de l'espace de *tracking*. Tout cela s'est fait ressentir sur les performances générales du participant où la maîtrise des interactions et des touches a mis plus de temps que les autres participants, d'autant plus que c'était la première fois que ce participant effectuait une mise en rayon. En revanche l'activité a été complétée correctement. Il s'agit d'un profil de participant assez spécifique selon les enseignants, mais qui n'est pas isolé. Cela soulève donc la question de la pertinence de la RV pour ces apprenants qui n'arrivent pas à s'immerger dans le monde virtuel. Surtout dans le cas où l'activité ne peut pas être

terminée à cause de ces problèmes d'immersion et de cybermalaise ou si l'apprenant possède plus d'affinités avec les manipulations réelles que virtuelles.

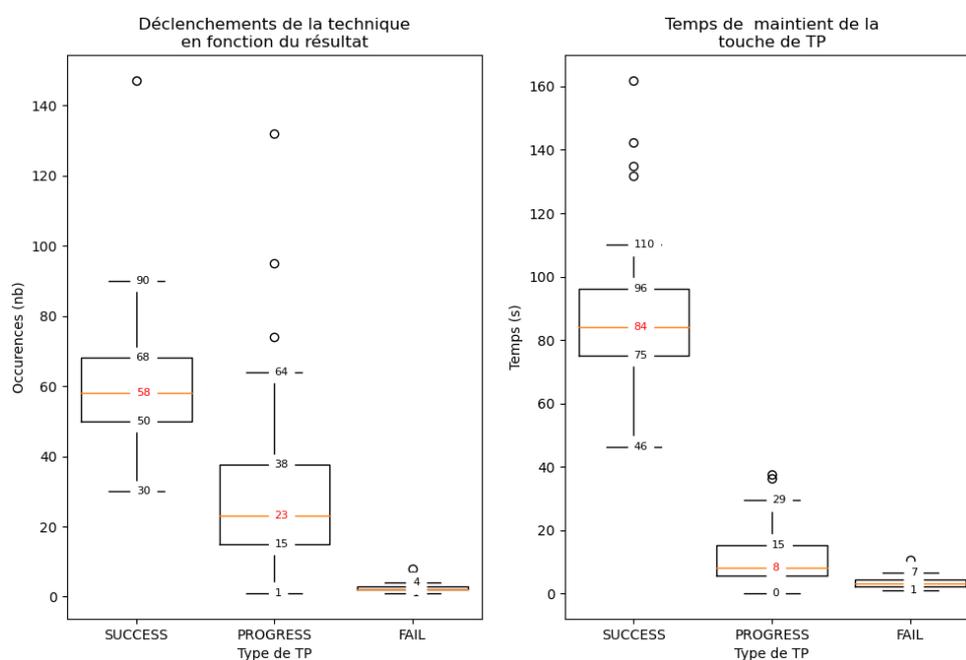


FIGURE 6.12 – Répartition des événements de téléportation (déclenchements et temps) ($n = 36$).

Nous avons observé ces comportements de cybermalaises qui se sont produits au début des sessions virtuelles. Après quelques téléportations, ces problèmes disparaissent. Nous avons également observé ce type de désagrément lors du retour dans le réel après avoir enlevé le casque. Les données du questionnaire indiquent que les participants ont apprécié la téléportation et ont réussi à l'utiliser correctement. Cela correspond à nos observations où les apprenants profitent du trajet jusqu'à la gondole pour s'entraîner à la téléportation. Les apprenants confondent parfois la touche action avec le bouton de téléportation, mais cela est très probablement lié au manque de maîtrise de l'outil. Par ailleurs, la touche qui a posé le plus de problèmes selon les apprenants est la touche de relâchement qui se situe sur les côtés de la manette du HTC Vive. Ces boutons sont difficilement accessibles pour certaines tailles de main et le retour haptique du bouton est difficilement perceptible. De ce fait les élèves tendent à oublier l'emplacement du bouton.

Intitulé	0 (Pas du tout d'accord)	1	2	3	4	5 (Tout à fait d'accord)
J'ai trouvé la méthode de déplacement simple à maîtriser/comprendre	0	1	3	6	8	19
J'ai trouvé la méthode de déplacement efficace	0	1	1	8	9	18
J'ai eu des sensations de mal-être pendant l'activité	19	5	2	7	3	1

TABLEAU 6.5 – Réponses au questionnaire sur la téléportation.

Des élèves nous ont fait part des problèmes de « *pixels* » (résolution) qui peuvent être gênants pour la réalisation de certaines tâches dans le monde virtuel. Finalement la téléportation dans le cas de notre expérimentation n'est pas la source des cybermalaises, ces derniers sont plus la conséquence de la qualité des casques de RV, qui lorsque l'on n'est pas habitué causent ces problèmes. Les avancées technologiques vont progressivement minimiser des effets de grille ou de résolution trop faible, limitant ainsi ces sensations désagréables. Tout cela nous permet de valider l'hypothèse **H6**, à savoir que la téléportation ne cause pas de cybermalaise aux participants.

6.4.4 Utilisation de la tablette virtuelle

Concernant les interactions sur la tablette, les apprenants ont trouvé la tablette utile, facile à utiliser et lisible (Figure 6.13a). Contrairement au prétest, nous n'avons pas eu de remarque à propos de *texte flou* ou de difficulté de lecture liée à la police de caractère. En effet, lors de cette expérimentation, nous avons eu un participant dyslexique et dysorthographique, celui-ci a indiqué que les textes sur la tablette sont lisibles et qu'ils étaient faciles à comprendre. Néanmoins, selon lui des consignes audios seraient plus appropriées, car c'est ce qu'il a l'habitude de rencontrer en stage lors de ses échanges avec son maître de stage. De plus, lire un paragraphe sur la tablette n'est pas chose aisée pour lui. Nous avons rencontré à plusieurs reprises ces problèmes de lectures, pour la consigne et également pour remplir le questionnaire post-virtuel.

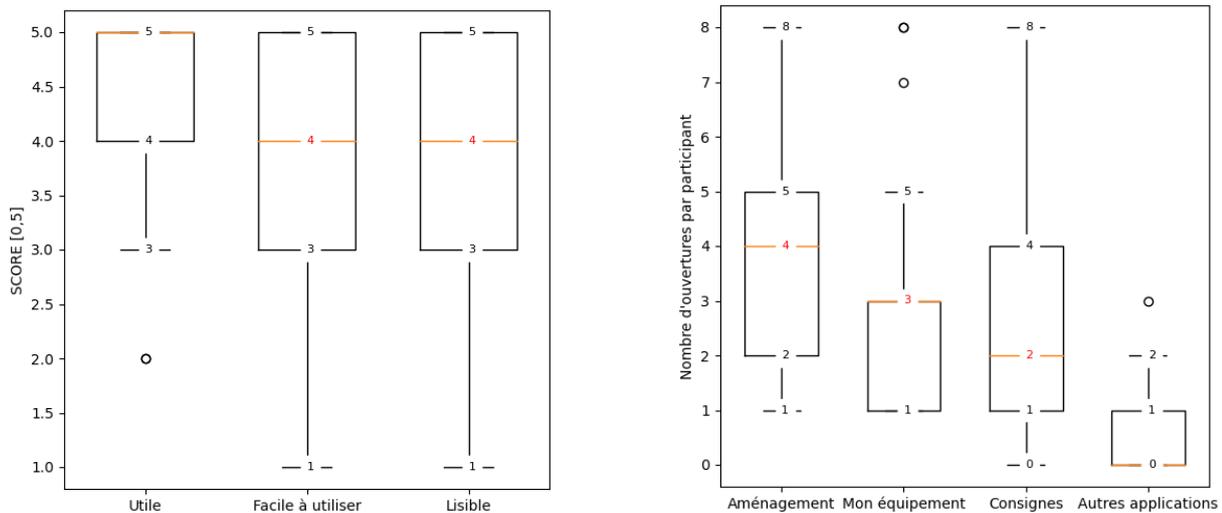
L'utilisation de la tablette est fonction de l'activité. En effet, certaines applications de la tablette sont activées ou non en fonction du besoin pédagogique. Ici, seules cer-

taines applications sont disponibles pour l'apprenant, parmi lesquelles certaines ne sont pas pertinentes et l'apprenant n'a pas à les utiliser. Nous avons gardé ces applications interactives dans le but de voir si les apprenants explorent les différentes fonctionnalités offertes par l'outil :

- **Application d'aménagement.** Permet de prendre un objet depuis la tablette.
- **Gestion de l'équipement.** Permet de prendre un outil. Ici seul l'outil *éponge* et *suppression* sont utiles pour l'élève. Les autres outils sont également présents afin de voir si les apprenants explorent chaque fonction ou se contentent d'utiliser les éléments nécessaires.
- **Consignes.** Cette application est présente sur toutes les activités.
- **Heure.** Cette application est présente sur toutes les activités.
- **Documents.** Cette application n'est pas pertinente pour le déroulé de l'activité. L'apprenant peut utiliser un plan pour se repérer dans l'EV, mais aucun élève n'a affiché le plan ni même un autre document. L'ouverture de l'application est soit non intentionnelle, soit suivant une logique d'exploration des fonctionnalités.
- **Stock.** Les variables didactiques font que les produits sont déjà prêts sur une palette, l'apprenant n'a donc pas besoin d'utiliser l'application de gestion des stocks. Seuls deux élèves ont ouvert l'application de stock, pendant environ six secondes chacun.
- **Appareil photo.** Cette application n'est pas obligatoire dans cette application. Cinq apprenants ont pris spontanément des photographies de leur réalisation (temps moyen pour prendre une photographie 27sec.).

L'application d'aménagement a été la plus utilisée (Figure 6.13b) par participant, avec une médiane d'utilisation à 4 ouvertures par session pour un temps médian de 168 secondes. Il s'agit du temps de parcours des différents éléments ainsi que de la découverte de ces derniers. L'application de gestion des équipements a également été utilisée, car pour pouvoir supprimer les picots⁸ et nettoyer la gondole, il est nécessaire de passer par cette application. Néanmoins, comparativement à l'application d'aménagement, il y a moins d'interactions sur cette application. Les données sur l'application de consigne sont intéressantes dans le sens où certains élèves ($n = 8$) n'ont jamais

8. Il s'agit d'un élément de rayonnage permettant de suspendre des produits sur une gondole. Cet objet peut également être appelé « perroquet »



(a) Réponses au questionnaire à propos de la tablette virtuelle ($n = 37$). L'échelle de 0 à 5 correspond aux intitulés des réponses sur le questionnaire, avec 0=Pas du tout d'accord et 5=Tout à fait d'accord.

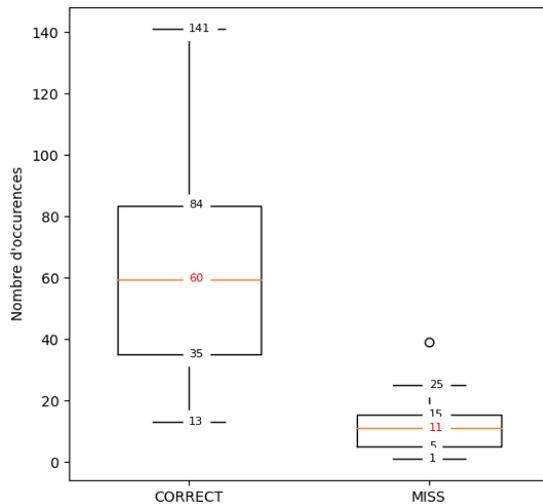
(b) Nombre d'ouvertures des applications de la tablette virtuelle ($n = 36$).

FIGURE 6.13 – Données relatives à la tablette virtuelle (objectives et subjectives).

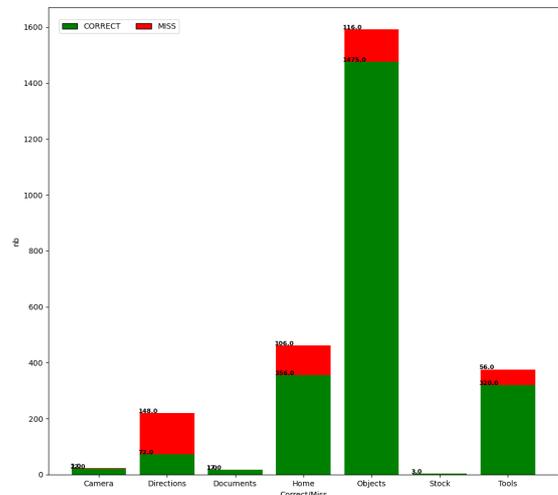
ouvert les consignes de l'activité, alors que les 29 autres ont accédé au moins une fois aux consignes. Pour cette application, la quantité d'ouverture et le temps passé à interagir doivent être considérés avec les observations sur le terrain. En effet, les élèves ont eu tendance à laisser l'application des consignes ouverte, de manière à avoir accès rapidement aux instructions. Or comme nous l'avons indiqué plus tôt, ce temps de lecture n'est pas quantifiable.

Les données expérimentales nous indiquent également que les élèves effectuent une quantité relativement faible d'erreurs de clics sur la tablette (Figure 6.14a). Une erreur de clic est un clic sur un élément non interactif. Par exemple cliquer sur une image au lieu de cliquer sur un bouton. À l'échelle des applications, nous remarquons que l'application de consignes est celle qui comporte le plus d'erreurs de clics (Figure 6.14b). Nous pouvons expliquer cela par le design général de l'application qui peut être à revoir.

Afin de déceler des différences notables entre les participants vis-à-vis de l'utilisation de la tablette virtuelle, nous avons procédé à une classification des participants



(a) Représentation graphique des types de clics sur la tablette virtuelle par participant.



(b) Répartition des clics sur la tablette virtuelle en fonction des applications.

FIGURE 6.14 – Données de clics sur la tablette virtuelle ($n = 36$).

selon différents critères liés à la tablette virtuelle :

- Temps d'interaction sur chaque application.
- Nombre d'ouverture de chaque application.

Le dendrogramme ainsi créé est illustré par la figure 6.15. La classification sur la tablette virtuelle est composée de trois groupes ($TB_A : n = 14$, $TB_B : n = 16$, $TB_C : n = 6$). Nous avons volontairement omis d'intégrer comme critère de classification les clics manqués sur la tablette, car nous souhaitons voir si les profils ayant été les plus rapides comportent des différences vis-à-vis des clics. En effet, nous supposons que sous l'effet de la précipitation plus d'erreurs ont été réalisées.

Le premier groupe, TB_A est constitué des participants ayant été le plus efficace avec la tablette. C'est-à-dire qu'ils ont passé comparativement aux deux autres groupes très peu de temps à interagir sur celle-ci ($U = 4$ $p = 0$; $U = 0$ $p = 0.0004$), à cliquer ($U = 3.5$ $p = 0$; $U = 0$ $p = 0.0004$) ou encore à faire des erreurs de clics ($U = 11$ $p = 0$; $U = 13.0$ $p = 0.0124$). Il s'agit également du groupe le plus rapide à faire l'activité pédagogique (variable *total_time*, $U = 41.0$ $p = 0.003$; $U = 15.0$ $p = 0.0196$) et celui avec TB_B qui estime le mieux le temps passé en virtuel, contrairement à TB_C qui estime

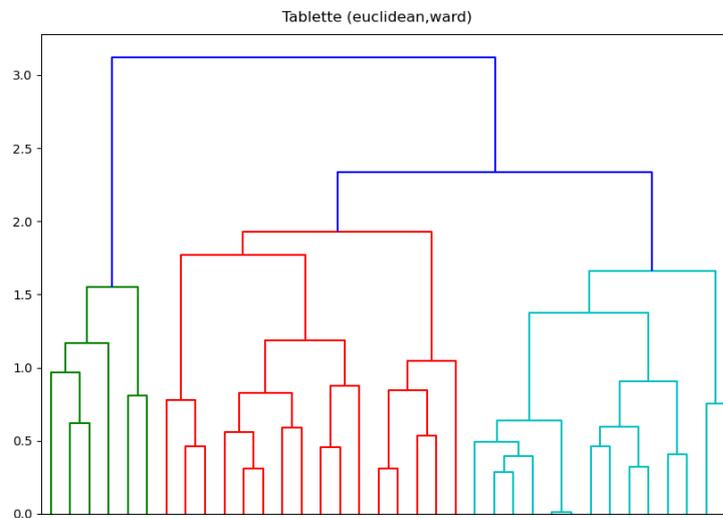


FIGURE 6.15 – Classification en fonction des variables de la tablette virtuelle. De gauche à droite : TB_A , TB_B , TB_C .

avec le moins de précision le temps passé en RV ($U = 0.0$ $p = 0.00246$). En revanche, le temps de complétion de l'activité pédagogique est équivalent pour le groupe TB_B et TB_C . Une autre différence significative entre le premier groupe TB_A et les deux autres TB_B et TB_C , réside dans le nombre d'ouvertures des applications, où TB_A ouvre très peu de fois les applications nécessaires à l'activité pédagogique, de même que pour le temps passé à interagir sur ces dernières. Les différences entre ces deux groupes TB_B et TB_C résident essentiellement dans la quantité de clics sur la tablette ($U = 8.0$ $p = 0.00179$) et l'utilisation de chaque application, où le groupe TB_C est plus lent et effectue plus d'actions que le groupe TB_B .

Concernant les autres variables non liées à la tablette, nous remarquons que le groupe TB_A déplace moins d'objets que les deux autres groupes, ce qui rejoint les tests sur les actions faites sur l'application d'aménagement de la tablette qui est la principale source de *grab* d'objets. Pris dans sa globalité, la tablette a été maîtrisée rapidement par les apprenants et ils ont trouvé l'outil intéressant et pratique en raison du gain de temps prodigué par l'aisance d'accès à certains objets. Bien que les trois groupes comportent certaines différences, ils représentent néanmoins tous des apprenants qui arrivent à utiliser et être autonome rapidement avec la tablette. Dans le cas de cette activité, nous pouvons valider l'hypothèse **H5** (*Les apprenants ont réussi à*

interagir sur les différentes interfaces de la tablette virtuelle). En revanche nous pensons que ces différences de profils seront plus prononcées dans le cas d'une activité de réception de commande où l'apprenant doit lire des documents complexes sur la tablette. En effet, dans ce cas précis, les icônes et le flat design sont mis de côté au profit d'éléments plus austère comme du texte.

6.4.5 Influence du contexte pédagogique sur la performance des apprenants

La classe des apprenants est une donnée importante à considérer, car notre approche de conception vise à donner accès à la RV pour les différents niveaux présents dans les établissements. Nous rappelons qu'il est possible de faire varier les situations pédagogiques virtuelles grâce aux variables didactiques. Cela nous permet de créer des situations d'apprentissages adaptées à la classe de l'apprenant qui utilise l'application. Néanmoins pour cette expérimentation, nous avons utilisé les mêmes variables didactiques pour tous les apprenants, car il s'agit d'une activité simple qui est réalisable par tous les niveaux d'apprenants. Cette utilisation commune de l'activité expérimentale par différentes classes d'apprenants (CAP, Seconde, Première, Terminale) constitue l'hypothèse **H1**. Nous nous sommes intéressés à la réussite de l'activité et l'utilisabilité de l'application en fonction de la classe des participants. La considération de l'établissement est également discutée ici dans le sens où certains établissements ne sont pas égaux en termes de population ou d'équipements, cela dans le but de valider ou non l'hypothèse **H2**.

Nous avons donc traité les données en fonction de la classe des apprenants, ce qui donne quatre groupes. Nous avons effectué un test de Kruskal-Wallis sur les quatre groupes et nous n'avons pas trouvé de variable comportant une différence significative. Les différents groupes utilisent l'outil de la même manière et les différentes stratégies sont à étudier au cas par cas en fonction du profil de l'apprenant. Par exemple un élève de CAP a mieux maîtrisé l'outil et mieux réussi la tâche par rapport à un Terminale, car il a effectué récemment une mise en rayon dans le cadre d'un stage, par conséquent il possède les compétences requises pour la réalisation de cette activité pédagogique. Alors que l'élève de terminale n'a effectué des stages que dans des boutiques de

prêt-à-porter impliquant d'autres méthodes, ce qui a augmenté le temps d'adaptation nécessaire. Les données rejoignent nos observations pendant l'expérimentation, où les différences entre classe ne sont pas visibles sur le plan de l'utilisabilité. Ce qui nous permet de valider l'hypothèse **H1**.

L'utilisation d'une classification basée sur les classes des apprenants ne met pas en avant des différences significatives sur le plan de l'évaluation menée par les enseignants. En effet, nous avons observé une tendance similaire à l'hypothèse **H1**, c'est-à-dire que les différences de réussite sont plus fonction de l'expérience de l'apprenant que de sa classe. Par exemple les élèves de CAP effectuent plus régulièrement ce genre d'activité en stage, alors que les élèves de Terminale ou de Première peuvent avoir des rôles différents dans des magasins plus éloignés de la grande distribution ou des grandes enseignes. Par conséquent une activité telle qu'une mise en rayon est moins pratiquée par les élèves de Première ou Terminale que ceux de CAP. Cela illustre également le fait qu'un apprenant ayant les bonnes compétences peut parfois mieux réussir l'activité virtuelle.

Les données du questionnaire nous indiquent que 31 participants ont déjà effectué cette activité, dont 31 en stage, 5 en job d'été et 4 sur le plateau technique (les apprenants pouvaient choisir plusieurs réponses dans le questionnaire). Les apprenants ont tous bien compris la consigne (Figure 6.16), trois d'entre eux ont dû être accompagnés dans les consignes tout au long de l'activité en raison de difficultés de lecture et d'apprentissage. Les participants pensent dans la globalité avoir réussi l'activité (Figure 6.16). Compte tenu de cela, nous ne sommes pas en mesure de valider l'hypothèse **H3** (*Les apprenants de haut niveau (Terminale) réussissent mieux la tâche que les apprenants novices (Secondes, CAP)*), nous émettons également des réserves sur cette hypothèse, car nous n'avons pas de moyen de savoir si les notations des enseignants sont biaisées en raison de la classe des apprenants. En effet, les enseignants peuvent sans le savoir considérer la classe des apprenants et noter différemment les CAP et les Terminales avec un degré d'exigence de résultats qui peut varier.

Nous avons par la suite analysé les traces numériques en utilisant l'établissement comme critère de caractérisation des groupes. Cinq groupes de lycées ont été définis (*L1, L2, L3, L4, L5*) (Tableau 6.6) et une analyse des traces a été conduite. Cette

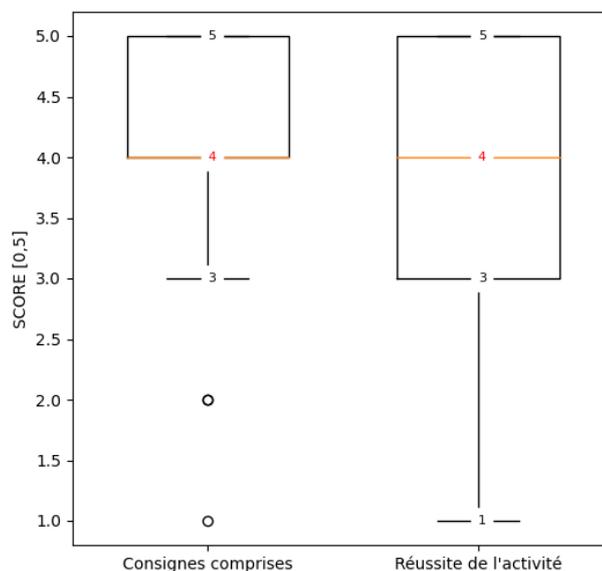


FIGURE 6.16 – Résultats du questionnaire des apprenants à propos de la compréhension des consignes et de l'estimation du succès de l'activité ($n = 37$).

dernière n'a révélé aucune différence significative entre les différents établissements. Nous avons comparé les résultats des grilles d'évaluations, en vue d'isoler des différences dans l'observation des enseignants ou lors de la conduite de l'entretien d'explicitation. Il n'y a pas suffisamment de données pour pouvoir dire qu'il existe une différence dans l'usage de la RV en fonction de l'établissement. Certains indicateurs sont différents tels que les apprenants du groupe $L1$ qui ont eu un score plus bas à l'indicateur « *Aménager le rayon* » par rapport aux apprenants du groupe $L2$ ($U = 2.0$ $p = 0.016$), mais cela peut s'expliquer par la population testée dans le Lycée1, notamment à cause de la présence de quelques élèves de Première de la filière Vente qui ne connaissent pas cette activité. Au regard de ces résultats, nous pouvons valider l'hypothèse **H2**, car les établissements ne constituent pas un facteur discriminant vis-à-vis de l'utilisabilité de l'outil auprès des apprenants.

6.4.6 Processus d'évaluation par les enseignants

Nous venons de voir que l'analyse de la grille d'évaluation pendant l'observation et pendant le débriefing n'a pas montré de différences significatives entre les deux

Groupes	Nombre de participants
L1	12 (2 CAP, 7 1 ^{ères} , 3 T ^{ales})
L2	6 (2 CAP, 2 2 ^{ndes} , 2 1 ^{ères})
L3	8 (2 2 ^{ndes} , 6 1 ^{ères})
L4	5 (2 1 ^{ères} , 3 T ^{ales})
L5	6 (3 2 ^{ndes} , 1 1 ^{ères} , 2 T ^{ales})

TABLEAU 6.6 – Répartition des apprenants en fonction de l'établissement.

méthodes, et ce, pour plusieurs classifications. Nous allons ici traiter les données du questionnaire rempli par les enseignants et également exploiter les entretiens réalisés avec les enseignants dans le but valider notre hypothèse en faveur de l'entretien d'explicitation.

Seize enseignants de la filière commerce ont participé à l'expérimentation (Figure 6.17). Sept d'entre eux ont déjà utilisé la RV et cinq connaissent cette application, car ils ont participé à l'écriture ou aux prétests. Pour mieux comprendre le contexte d'enseignement, nous devons préciser que pour 6 enseignants, l'activité de mise en rayon n'est pas effectuée sur un plateau technique, et pour le reste des enseignants, trois soulignent le fait que cette activité n'est pas facile à mettre en œuvre. Cela illustre les différences entre les établissements, où certains proposent cette activité alors que d'autres ne le peuvent pas, soit par manque d'équipement, d'enseignants ou alors il peut s'agir d'une activité non réalisable avec les effectifs d'élèves par classe. Néanmoins les enseignants s'accordent sur le fait que cette activité est régulièrement rencontrée en milieu professionnel.

Le format de grille en elle-même est perfectible selon eux et nous notons des différences d'appréciation de la méthode entre les enseignants, alors même que cette dernière a été suggérée par certains d'entre eux lors de la préparation de l'expérimentation. Nous pensons qu'au moment de la préparation de l'expérimentation, les enseignants n'avaient pas le recul suffisant sur l'usage de la RV pour pouvoir proposer une méthode adaptée d'évaluation. En effet, nous rappelons qu'il s'agissait d'une première approche d'utilisation de la RV pour les enseignants. Par ailleurs, nous pensons que ces avis à propos de l'emploi d'une grille de notation peuvent être liés aux pratiques quotidiennes, où la grille convient bien aux enseignants qui évaluent régulièrement en individuel sur le plateau technique alors que pour des établissements ayant des effectifs par classe plus conséquents, la grille ne semble pas appropriée. De plus

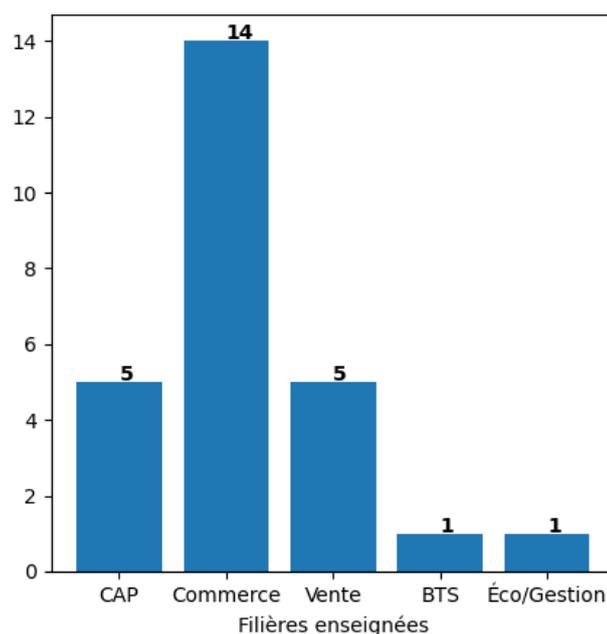


FIGURE 6.17 – Répartition des enseignants participants à l'expérimentation en fonction des filières dans lesquelles ils enseignent ($n = 16$).

le format utilisé pour l'évaluation paraît dépendre de la finalité de la session virtuelle, c'est pourquoi certains enseignants ont indiqué penser préparer leurs propres supports d'évaluation en fonction de l'activité pédagogique et des variables didactiques.

Tous les enseignants ont participé à l'évaluation d'au moins un élève en observation et en débriefing. Nous avons remarqué que pendant les temps d'observation les enseignants guidaient naturellement les apprenants en difficulté. En effet, les enseignants ont accompagné les élèves en donnant des instructions comme « *Utilise ta tablette* », « *Pense à prendre un carton vide* » ou encore « *Regarde bien ta TG, tout est bon ?* » (Tableau 6.7). De plus, les élèves ont parfois demandé de l'aide aux enseignants pour savoir ce qu'il fallait faire.

Concernant l'entretien d'explicitation, les enseignants indiquent une durée moyenne de 7,8 minutes par entretien (Figure 6.18a), ce qui correspond, pour ceux qui pratiquent des exercices équivalents, à une temporalité normale. Différentes stratégies ont été mises en place, car nous n'avons pas imposé une conduite spécifique d'entretien à suivre. Nous avons seulement conseillé quelques phrases types pour amorcer

Raison de l'interaction avec l'élève pendant l'observation	Nombre de réponses
L'élève ne savait pas quelle tâche il devait effectuer	7
L'élève était perdu dans l'environnement virtuel	7
L'élève a oublié de faire une tâche importante	3
L'élève vous a sollicité	7
Pour donner des conseils à l'élève	12
Pour demander à l'élève de commenter ce qu'il vient de faire	6

TABLEAU 6.7 – Origine des interventions des enseignants lors de l'observation de l'activité pédagogique.

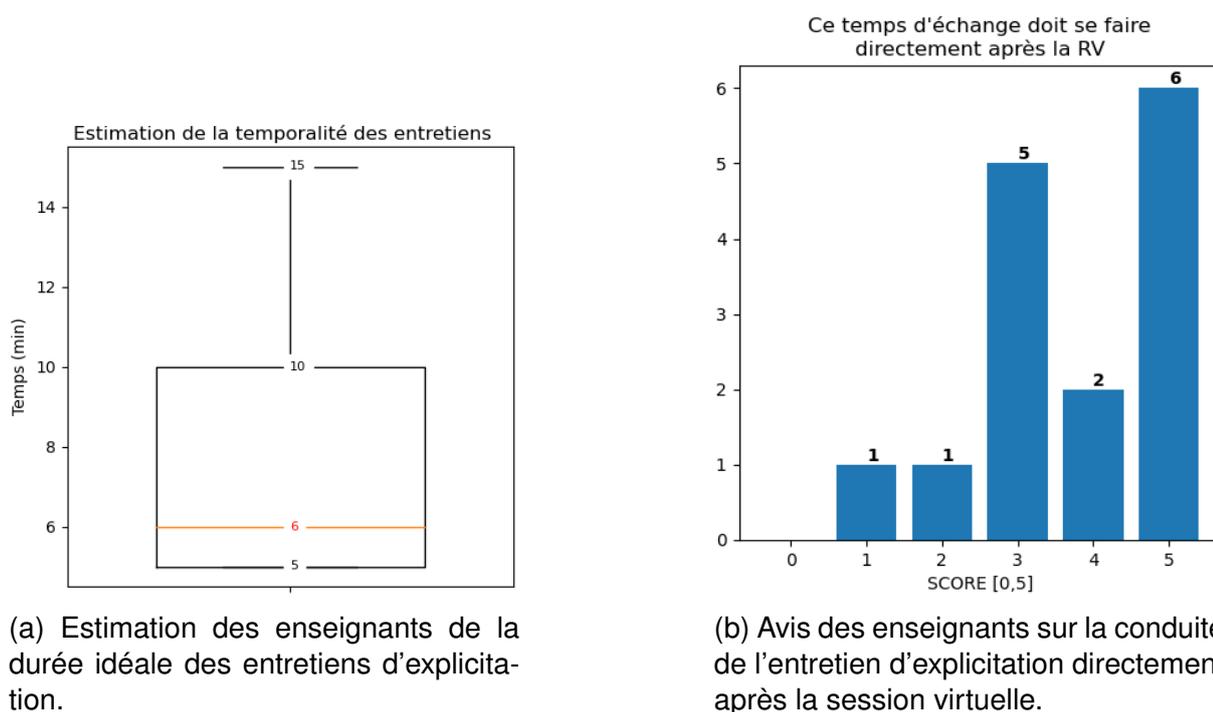


FIGURE 6.18 – Données subjectives des enseignants à propos de l'entretien d'explicitation ($n = 16$).

l'entretien d'explicitation. Nous avons fait le choix de laisser les enseignants s'adapter en fonction du profil des élèves, qu'ils connaissent bien. Cependant, l'essentiel des enseignants pense qu'il faut effectuer cet exercice directement après la session virtuelle (Figure 6.18b), alors que dans notre hypothèse, nous avons prévu que le débriefing puisse également être effectué plus tard afin de favoriser le travail en autonomie des apprenants. La mise en place au sein de la classe est équivalente entre l'approche par observation et l'utilisation de l'entretien d'explicitation.

Dans le questionnaire, les deux méthodes sont comparées et les résultats sont consignés dans le tableau 6.8 :

Question	Observation	Débriefing	Les deux se valent
Quelle méthode d'évaluation avez-vous le plus apprécié ?	5	7	4
Selon vous, quelle méthode est le plus facile à mettre en place pour une utilisation en classe ?	6	7	3
Salon vous, quelle méthode est le plus intéressante d'un point de vue pédagogique	4	6	6
D'après-vous, quelle méthode est le plus riche d'un point de vue pédagogique ?	4	5	7
D'après-vous, quelle méthode est le plus enrichissante pour les élèves ?	4	7	5

TABLEAU 6.8 – Comparaison des deux méthodes d'évaluation par les enseignants dans le questionnaire.

Par rapport à l'entretien d'explicitation, la situation d'observation obtient une quantité de réponses plus faible, cependant cette différence n'est pas assez significative pour nous permettre de valider l'hypothèse **H0**. Il convient donc d'explorer plus en détail les raisons de cette distribution de choix grâce aux entretiens menés avec les enseignants après les sessions expérimentales.

6.4.7 Étude des entretiens post-expérimentaux

Les entretiens et les observations pendant les sessions virtuelles nous indiquent qu'il existe bel et bien des différences entre les classes des apprenants, contrairement aux traces qui nous ont permis de valider les hypothèses **H1** et **H2**. Néanmoins cette différence se situe sur l'aspect pédagogique de la RV et non sur son utilisabilité. En effet, les enseignants s'accordent tous sur le fait que les apprenants maîtrisent rapidement l'outil. Les élèves de CAP ou Secondes sont décrits dans les entretiens comme

étant moins autonomes que les élèves de Première et Terminale, essentiellement en raison du manque de connaissances, mais également d'un manque d'assurance dans l'activité pédagogique. Les élèves de CAP et de Seconde sont également selon les enseignants moins sûrs d'eux dans la réalisation de la tâche virtuelle, comme lors d'activités réelles. Ce qui pousse les apprenants à ne pas prendre d'initiative dans le monde virtuel. Cela rejoint nos observations sur l'autonomie des élèves pendant les sessions expérimentales, où ces derniers ont posé des questions sur l'avancement du scénario, notamment pour savoir si l'activité pédagogique était terminée. Lors des entretiens, les enseignants nous ont indiqué que la même problématique existait pour les activités réelles ne comportant pas de guidage précis. En effet, l'essentiel des élèves n'a pas su déterminer si le travail était terminé ou non.

La consigne est plus facilement acquise et respectée par les élèves de première ou de terminale, contrairement aux autres classes qui ont eu parfois des difficultés à comprendre ce que l'on attendait d'eux. Pour certains élèves de CAP ou de Seconde, les enseignants ont dû lire la consigne et expliquer plus précisément ce qu'il faut faire. D'une part en raison de problèmes de lecture et de compréhension et d'autre part pour faire le parallèle avec les enseignements classiques qu'ils ont l'habitude d'avoir. Cette étape d'individualisation de la tâche est selon les enseignants, appropriée pour certains profils d'apprenants. L'utilisation d'une terminologie précise est donc très importante et peut changer d'un établissement à l'autre en fonction du contexte.

Les préférences de la méthode d'évaluation ne sont pas liées à un manque de traces numériques, ou un quelconque problème d'utilisabilité de l'outil (Figure 6.19). Les enseignants ont indiqué lors des entretiens que les traces actuelles suffisent largement, notamment les photographies qui sont un support pédagogique pertinent. Au contraire, surcharger les traces peut nuire selon eux à l'exploitation pédagogique.

L'entretien d'explicitation est perçu comme permettant à l'élève de justifier ses choix, car comme l'a indiqué un enseignant : « *la machine [l'application virtuelle] peut consigner une action qui peut m'amener, à la lecture du rapport, à dire que ce n'est pas bon. Alors qu'après avoir entendu l'argumentaire de l'élève, finalement l'action révèle être tout à fait pertinente.* ». Par ailleurs, l'entretien d'explicitation demande une certaine préparation tant dans l'analyse des traces que dans le choix des questions

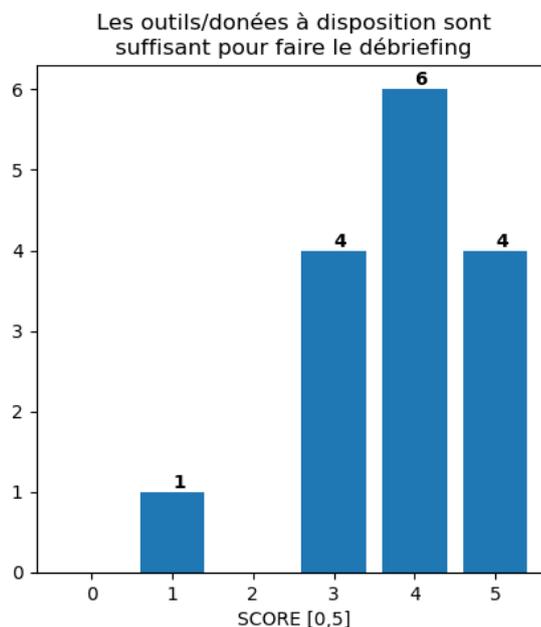
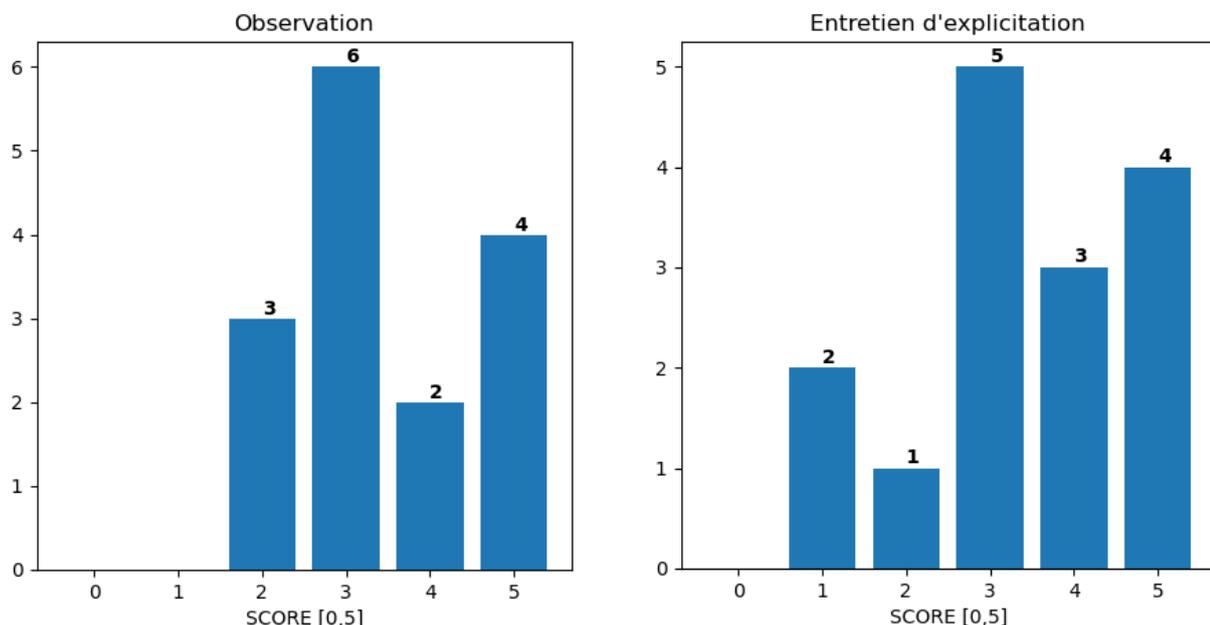


FIGURE 6.19 – Réponses au questionnaire enseignant à propos de la pertinence des outils pour conduire le débriefing ($n = 16$). Le score correspond aux intitulés des réponses sur le questionnaire, avec 0=Pas du tout d'accord et 5=Tout à fait d'accord.

à poser à l'élève. C'est pourquoi certains ont suggéré que l'enseignant qui effectue l'entretien d'explicitation doit avoir observé l'apprenant de manière à mieux guider l'entretien. Néanmoins, les enseignants se sont accordés sur le fait qu'en procédant de cette manière, l'enseignant ne serait pas capable de faire autre chose comme gérer le reste de la classe. Dans les deux cas d'exploitation, les enseignants jugent ces méthodes aisément utilisables en conditions réelles de manière générale (Figure 6.20), c'est-à-dire sans considérer les aléas du terrain (élèves, salles de classe, matériels).

En raison des effectifs parfois importants, l'entretien d'explicitation a été mis en avant. Il est supposé qu'il soit possible de faire travailler en autonomie un apprenant, tout en gérant le reste de la classe. Néanmoins, certains enseignants ont indiqué que cette approche n'est pas réalisable dans tous les contextes. Par ailleurs, il peut être approprié d'avoir une salle de RV qui juxtapose la salle où se situe le reste de la classe, de manière à pouvoir garder un lien avec l'apprenant en immersion. Finalement, les effectifs d'apprenants ne sont pas la cause principale de ces problèmes d'exploitation, car certains enseignants envisagent d'utiliser la RV avec une classe de 30 élèves, avec



(a) L'observation est facile à mettre en place en classe.

(b) Le débriefing est facile à mettre en place en classe.

FIGURE 6.20 – Appréciations des enseignants à propos des deux méthodes d'évaluation ($n = 16$).

deux apprenants sur le pôle immersif et le reste de la classe qui effectue un travail, avec ou sans lien avec l'activité virtuelle. D'autres jugent possible l'utilisation en petit groupe de la RV, avec du travail en autonomie lorsque cela est possible. Alors que d'autres enseignants ont indiqué ne pas pouvoir utiliser la RV, même avec des effectifs de 18 élèves par classe, car gérer deux pôles pédagogiques n'est pas réalisable. À moins de mettre en place des situations de co-animation, ce qui n'est pas possible dans tous les établissements. Inversement, dans un autre établissement, pour les mêmes effectifs, une utilisation en autonomie est envisageable pour les enseignants, car les apprenants ont l'habitude de cela. La problématique ici réside sur deux points précis :

- le profil des élèves
- les moyens matériels et logistiques à disposition des enseignants

Le profil des élèves est la première considération des enseignants lorsque nous avons évoqué les méthodes d'exploitation de la RV. En effet, pour certains élèves le travail en autonomie est envisageable, alors que pour d'autres cela pose plus de pro-

blèmes.

L'autre élément qui influence les préférences des enseignants dans les usages de la RV avec les apprenants est le comportement des élèves vis-à-vis du matériel informatique. En effet, cette remarque est intervenue dans deux établissements où les dégradations matérielles dans les salles informatiques sont nombreuses, rendant impossible pour les enseignants, la mise en place de travaux en groupes ou en autonomies autour d'outils informatiques. Compte tenu de cela, il est compliqué pour les enseignants d'envisager un usage en autonomie de la RV, de peur de dégradations. C'est pourquoi seules les exploitations où l'enseignant est physiquement présent à proximité du poste de RV sont envisageables. Par ailleurs, l'exploitation en classe entière ou en groupe est également fonction des profils. En effet, dans un établissement les enseignants nous ont indiqué qu'il n'est pas forcément possible de faire des analyses en temps réel en classe entière majoritairement à cause des moqueries régulières qui peuvent parfois être violentes. Dans de tels cas, l'utilisation des traces numériques anonymisées est pertinente, car cela peut permettre un travail d'analyse individuel, en groupe ou en classe entière. Ces deux aspects (détérioration du matériel et moqueries des apprenants) illustrent bien la complexité de l'implantation d'une nouvelle technologie telle que la RV ainsi que la mise en place de processus expérimentaux visant à valider des approches pédagogiques reposant sur la RV. En effet, les méthodes d'exploitation pédagogique sont fortement liées au contexte de l'établissement et des apprenants. C'est pourquoi les préférences en termes d'utilisation de ce nouvel outil de formation changent selon les interlocuteurs. Par conséquent, cela justifie l'adoption de plusieurs approches flexibles autorisant l'enseignant à choisir la méthode en fonction de la situation.

Vient ensuite l'aspect matériel. Les enseignants mobilisés nous ont indiqué que la RV est un lieu intéressant pédagogiquement, en revanche il faut pouvoir l'intégrer dans l'établissement. À l'inverse des plateaux techniques des filières STI, en tertiaire de nombreuses inégalités subsistent, ne serait-ce que vis-à-vis de l'implantation des classes et du magasin pédagogique. Dans certains établissements, le magasin est présent dans un bâtiment et les salles de classe dans un autre. Comme l'indique clairement une enseignante lors d'un entretien « *Lorsque j'ai présenté la RV au proviseur et au chef des travaux, la première chose qui a été dite c'est "On le met dans quelle*

salle ?" ». En effet, l'idéal serait de placer l'équipement virtuel à proximité d'une salle informatique ou du plateau technique. Or ce n'est possible que dans de très rares cas. Par conséquent lorsque la disposition des salles le permet, les enseignants se sont projetés dans une utilisation possible du travail en autonomie ou encore la projection en temps réel dans la salle juxtaposée. Lorsque cela n'est pas possible, alors les enseignants préfèrent une exploitation des traces numériques a posteriori. Par ailleurs, les avis des enseignants divergent à propos de l'exploitation pédagogique à mettre en place lors de l'usage de la RV. Essentiellement, car ils se projettent dans le contexte de leurs établissements respectifs. Or l'implantation et l'usage de la RV ne se conçoit pas de la même manière dans tous les établissements.

Au regard de ces éléments décrit par les enseignants lors des entretiens post-expérimentaux, nous ne pouvons pas valider l'hypothèse **H0**. Il faut tenir compte de beaucoup de variables pour pouvoir prétendre proposer une approche généralisable dans la majorité des contextes pédagogiques. Par exemple l'activité pédagogique, le profil des élèves, les moyens matériels / logistiques à disposition des enseignants ou encore le profil des enseignants. En revanche, contrairement aux hypothèses **H1** et **H2** nous pouvons dire qu'il existe une différence d'utilisation pédagogique de l'outil entre les classes et les établissements. Cette différence est liée aux profils et aux autres caractéristiques des établissements décrits dans cette sous-section.

6.5 Discussion

Cette expérimentation nous a permis d'évaluer notre approche de conception d'EVs sur le terrain avec des apprenants et des enseignants. Les résultats sont discutés plus précisément cette section.

6.5.1 Temporalité de l'activité pédagogique

L'hypothèse **H4** porte sur les différences de temps de réalisation de l'activité pédagogique en fonction de la classe des apprenants. En effet, les élèves de terminale ont effectué plus de stages que les élèves de seconde ou de CAP. Or l'activité de l'expéri-

mentation implique une tâche emblématique de cette filière (activité de mise en rayon). Le fait que les données ne nous permettent pas de valider les hypothèses **H4** nous indique plusieurs choses. Tout d'abord que le temps de réalisation n'est pas corrélé avec le degré de réussite et que ce dernier ne dépend pas de la classe de l'apprenant. En effet, les fluctuations de temps reposent uniquement sur l'expérience de l'apprenant ainsi que sur son degré d'implication dans la tâche. Certains élèves, plus méticuleux que d'autres mettent plus de temps pour finaliser la mise en rayon, soit parce qu'ils appliquent des règles précises de placement des produits, soit parce qu'ils souhaitent essayer plusieurs approches avant de valider l'activité. Ces différences temporelles nous indiquent également que la classe n'influence pas le degré de maîtrise de l'outil. Autrement dit, quelle que soit la classe, les apprenants apprennent à utiliser l'outil à la même vitesse. Le temps supplémentaire peut être lié aux hésitations concernant les actions à effectuer dans le monde virtuel, mais cela s'estompe lorsque l'apprenant a pris correctement en main les interactions.

En revanche, nous devons remettre ces éléments temporels en perspective lors de l'utilisation de la RV pour d'autres filières. En effet, dans certains métiers, le temps de réalisation est pris en compte dans la performance de la tâche. Par exemple, lors de la gestion de cadences sur une ligne de production, le temps de réaction de l'apprenant est crucial pour pouvoir atteindre les objectifs de production. Ou encore le temps mis à diagnostiquer une panne qui influence négativement les données de production. Par conséquent, nos hypothèses à propos du temps peuvent être également valides dans d'autres filières.

6.5.2 Navigation dans l'EV

Nous avons proposé une personnalisation de la technique de téléportation classiquement utilisée pour correspondre plus précisément aux besoins de la formation tout en essayant de réduire le déclenchement de cybermalaises (hypothèse **H6**). L'utilisation de la parabole telle que suggérée par Funk *et al.* (2019) a bien été perçue par les apprenants. De même que la limite de distance et le temps d'attente qui ont permis aux apprenants d'assimiler les détails de l'EV (élément important pour une découverte d'EV). Avec ces contraintes, la téléportation reste une technique de navi-

gation plus rapide que la translation (à une vitesse raisonnable), néanmoins, certains apprenants ont trouvé les déplacements longs et auraient souhaité naviguer plus rapidement. Nous pouvons imputer cela aux profils de certains apprenants qui souhaitent que les tâches soient exécutées rapidement. Nous pensons que le simple fait de devoir attendre quelques secondes suffit à donner l'impression que la technique de déplacement est lente. Nous précisons également que cette expérimentation se déroule dans un EV clos, et nous pensons qu'une utilisation dans un monde virtuel plus ouvert peut permettre une diminution du temps d'attente et une augmentation de la distance maximale autorisée. Christou et Aristidou (2017) ont trouvé que la téléportation dans un EV ouvert ne pose pas de problèmes d'orientations. Les désorientations décrites par Bowman *et al.* (1997) sont selon nous fonction des variations de la technique et de l'EV.

Sur notre échantillon de 37 élèves, seul un participant a ressenti des symptômes de cybermalaise. D'autres participants ont indiqué ressentir des « sensations étranges » au moment d'enlever le casque. Notons par ailleurs que les apprenants ont parfois du mal à expliciter certaines sensations. Nous pouvons également évaluer plus précisément les cybermalaises en utilisant le SSQ (Kennedy *et al.*, 1993). En revanche, surcharger l'apprenant de questionnaires post-expérimentaux peut selon nous engendrer des résultats faussés, car certains apprenants souhaitent terminer rapidement le remplissage des questionnaires. Ou encore, en raison de problèmes de compréhension des questions. C'est pourquoi nous pensons que dans une démarche expérimentale appliquée à la formation professionnelle, l'élaboration de questionnaires simples, focalisés sur des éléments précis peut être pertinente. Par ailleurs, l'emploi d'entretiens semi-directifs combinés à un enregistrement audio des échanges est à privilégier lorsque cela est possible par rapport à l'utilisation de questionnaires.

6.5.3 Les usages de l'outil

Les hypothèses **H1** et **H2** portent respectivement sur l'utilisation de l'outil virtuel par les apprenants en fonction des classes et des établissements. Les données issues de l'application ainsi que du questionnaire nous ont permis de valider ces deux hypothèses. En effet, les différences d'usages ne sont pas liées à la classe ou l'établissement de l'apprenant. Par ailleurs, les différences d'usages de l'outil ou des interac-

tions ne sont pas significatives pour cette expérimentation. L'approche de conception que nous avons mise en place, notamment grâce à l'étayage des interactions 3D ainsi qu'aux diverses approches génériques, a permis aux apprenants de maîtriser convenablement l'outil, quel que soit leur degré de familiarité, comme le montrent les données d'utilisation de la tablette virtuelle ainsi que les observations liées à l'emploi de cet outil. Par ailleurs, seul un participant n'a pas réussi à terminer l'activité sur les 38 participants, les autres ont mis en moyenne 26 minutes pour compléter l'activité alors qu'il s'agissait pour tous, d'une première expérience de la RV dans un contexte de formation, ainsi qu'une première utilisation de notre EV. Cela rejoint les résultats de Fabola et Miller (2016) qui statuent que les apprenants trouvent la RV facile à utiliser quelles que soient leurs expériences passées. Nous pensons que la présence de l'étayage des interactions 3D ainsi que l'approche générique des actions virtuelles a contribué à réduire le temps passé dans le monde virtuel.

En revanche, nous pensons que dans certains cas précis d'usages, des différences peuvent être visibles. Notamment lors d'une utilisation de l'outil avec des apprenants ayant des difficultés d'apprentissage. Dans de tels cas, la compréhension des consignes pose des problèmes significatifs, surtout concernant l'autonomie dans l'EV. Cet effet est accentué dans le cas d'une première utilisation de l'outil, où en plus de la compréhension des consignes, l'apprenant doit apprendre à utiliser les manettes et se familiariser avec les interactions 3D. Ceci rend la première session d'utilisation très longue et peut engendrer une perte de motivation comme nous avons pu le constater avec l'apprenant qui a abandonné l'expérimentation au bout de 42 minutes dans le monde virtuel. Lors de l'abandon, l'élève n'avait pas encore effectué la moitié de l'activité.

Selon les enseignants, les différences entre les classes vont s'effectuer sur le degré de réalisation et de précision mis en œuvre dans la tâche par les apprenants. Les problèmes d'usage de l'outil seront conditionnés aux profils des apprenants et peuvent être plus nombreux pour les apprenants en difficulté ou ceux de classes spécialisées.

6.5.4 Utilisation de la tablette virtuelle

La tablette virtuelle que nous avons proposée est une métaphore d'interaction 3D qui sert à simplifier certaines actions dans le monde virtuel. Les données d'utilisation de la tablette virtuelle ne nous ont pas permis d'identifier des participants en grande difficulté. En revanche, les données nous indiquent qu'il faut veiller à ce que les composants interactifs soient suffisamment gros et lisibles pour permettre une bonne utilisabilité avec le *raycast*. En effet, les données textuelles ont toujours été un souci en RV à cause de la résolution. Cela s'est notamment illustré sur l'application de consignes, où les utilisateurs ont eu du mal à revenir sur le menu principal, causant une perte de temps. Cependant, les apprenants ont apprécié cette approche et l'ont trouvée utile (hypothèse **H5**). En revanche, la tablette monopolise une main, ce qui empêche les interactions à deux mains, à moins que l'utilisateur ne relâche la tablette, ce qui implique une action supplémentaire. De plus, lors de l'utilisation d'une interface dans le monde virtuel, il faut que le concepteur porte toute son attention sur l'interface, qui doit adopter une taille raisonnable, adaptée à la technique de sélection proposée. L'utilisation d'approches diégétiques complexifie également les interactions sur les interfaces dans le sens où une intégration raisonnable se fait à une échelle réaliste, c'est-à-dire adaptée à la représentation réelle souhaitée (ex. : écran de smartphone virtuel, panneau d'affichage).

6.5.5 Réussite de l'activité pédagogique

Seul un participant n'a pas terminé l'activité pédagogique proposée en raison de problèmes de compréhension de la consigne ainsi que d'une mauvaise utilisation des contrôleurs. En revanche, les autres participants ont tous complété l'activité et la notation effectuée à l'aide de la grille d'évaluation ne permet pas d'identifier la cause de ces différences de notations des apprenants. En effet, il n'y a pas de lien significatif entre la notation et les données relatives aux apprenants (traces numériques, questionnaire). Bien que dans les grandes lignes, l'activité ait été terminée correctement, certains apprenants n'ont pas effectué certaines tâches, telles que la mise en place de la PLV ou encore la pose de balisage sur les tablettes de la gondole. Ces éléments ne sont pas corrélés à la classe de l'apprenant ou bien à l'établissement. Deux facteurs rentrent ici en compte : (1) L'expérience professionnelle de l'apprenant. Ceux qui ont pensé à

bien disposer les produits, mettre les étiquettes ou effectuer le balisage ont indiqué déjà avoir effectué cette activité dans un contexte de stage ou pour certains, dans le magasin pédagogique de l'établissement. (2) La compréhension de la consigne. Certains apprenants, bien que n'ayant pas ou peu effectué cette activité en réel l'ont quand même réussie en virtuel, car ils ont mieux compris la consigne et également ce que l'on attendait d'eux. Ils ont par ailleurs considéré l'outil virtuel comme étant un outil pédagogique et non un jeu.

L'hypothèse **H3** ne peut donc pas être vérifiée, car les profils des apprenants, influencés par leur vécu, ont un impact trop important sur la réussite de l'activité. Cela conforte donc notre position à propos des approches flexibles permettant aux enseignants d'adapter le contenu pédagogique en fonction des élèves.

6.5.6 Processus d'évaluation de l'apprenant

Notre hypothèse principale, **H0** mettait en avant l'approche par entretien d'explicitation (Guigue-Durning, 1996; Radigois, 2018) par rapport à une évaluation par l'observation. L'entretien est mis en avant pour ses capacités à effectuer l'exploitation pédagogique après la mise en situation immersive. Nos résultats n'indiquent pas une préférence particulière pour l'entretien d'explicitation par rapport à l'évaluation en temps réel. Le choix de la technique est fonction du contexte pédagogique, soit en raison du profil de l'apprenant, soit à cause des choix pédagogiques de l'enseignant ou des autres contraintes présentes dans les établissements évoqués dans la section précédente. Ces résultats vont également dans le sens de Philip (2005) qui explique que pour que l'observation soit formative, elle doit être suivie d'une intervention. De plus, les enseignants rejoignent cette idée développée par Philip (2005) que l'observation ne doit pas être présente pour juger l'apprenant, mais pour l'aider. Dans notre cas cela peut être l'entretien d'explicitation, ou une tout autre méthode d'exploitation des indicateurs de performances.

Les entretiens avec les enseignants ont souligné l'importance de ne pas avoir de méthodologie unique imposée pour conduire l'évaluation. L'entretien d'explicitation n'est pas remis en cause ici, bien au contraire, il est en effet très pertinent selon les en-

seignants, la présence d'un référent étant bénéfique à l'entretien (Verkuyl *et al.*, 2018). Néanmoins, pour des raisons pratiques et de gestion de classe, d'autres méthodes peuvent s'avérer plus faciles à mettre en œuvre et également pertinentes, comme l'emploi de débriefing en groupe d'apprenants sans instructeur (Boet *et al.*, 2013; Beaubien et Baker, 2003), ou encore l'auto-évaluation (Boet *et al.*, 2011; Oikawa *et al.*, 2016)

Concernant les traces numériques, elles apparaissent être un bon support d'explicitation pour les enseignants. Le rapport ainsi que les images suffisent aux enseignants pour cerner et exploiter la session pédagogique. En revanche les captures vidéos ont été peu exploitées, majoritairement à cause du point de vue à la première personne, et également, car il est difficile d'isoler les instants précis de la réalisation de l'activité effectuée. L'utilisation de vidéos lors du débriefing est renseignée dans la littérature comme donnant un résultat pédagogique équivalent à la situation sans utilisation de vidéos (Roh *et al.*, 2016; Beaubien et Baker, 2003). Contrairement à d'autres domaines de formation où la réalisation est filmée, en contexte de RV, nous avons capturé le point de vue de l'apprenant sur le monde virtuel. Nous pensons que cela a influencé négativement l'apport potentiel des vidéos lors du débriefing, car deux enseignants ont éprouvé des cybermalaises lors de l'exploitation de la vidéo. D'autres ont également trouvé l'analyse de la vidéo trop longue à effectuer. L'emploi de la capture vidéo pour cette activité n'est donc pas forcément approprié, car l'apprenant effectue beaucoup de mouvements, surtout lors de la prise des produits depuis les cartons et aussi lors du placement des produits. En revanche, pour d'autres situations, la capture vidéo à la première personne peut être pertinente, notamment dans des situations dangereuses telles que des habilitations électriques, minutieuses, ou encore lorsque l'activité pédagogique est courte, c'est-à-dire moins de 15 minutes.

6.6 Synthèse

Nous mettons en avant dans ce chapitre plusieurs mises en application des méthodes décrites dans les chapitres précédents. Dont une application pour le Bac Pro Commerce, qui a fait l'objet d'une expérimentation. Grâce à une procédure de conception flexible, nous avons réussi à transposer différentes activités pédagogiques du réel vers le virtuel. Ces activités virtuelles se révèlent être pertinentes pour les élèves de

différentes classes et différents profils, ainsi que pour les enseignants. Notre approche générique s'est révélée efficace pour la formation commerce en particulier, car elle permet d'adapter rapidement certaines fonctionnalités. Ce choix d'une approche générique s'est également révélé être un support solide à l'élaboration rapide de prototypes dans d'autres métiers (pilotage de ligne de production, visite de chantier).

La conception de protocoles expérimentaux est favorisée par cette approche générique, qui a permis en particulier l'élaboration et le développement d'un module de collecte automatique de données (gestion des traces), garantissant ainsi un moyen rapide et simplifié pour une analyse de la performance de l'activité.

L'expérimentation que nous avons menée avec des élèves et des enseignants nous a permis de mieux comprendre les objectifs et les problématiques de l'utilisation de la RV en contexte de formation professionnelle. En effet, la théorie au moment de l'écriture du scénario et de la programmation des interactions 3D doit être confrontée aux pratiques des utilisateurs finaux. Nous avons vu, par exemple, à l'issue de cette expérimentation que les apprenants étaient peu sensibles aux cybermalaises, surtout grâce aux techniques d'interaction proposées, telles que la téléportation ou encore à l'optimisation du rendu 3D (*frame rate*). Ces éléments permettent un niveau d'immersion et de réalisme suffisant pour permettre un sentiment de présence. Les effets bénéfiques de l'approche de simplification des interactions 3D autorisent des sessions virtuelles courtes, de l'ordre d'une trentaine de minutes dans le cas d'une découverte d'une nouvelle activité comme dans le cas de notre expérimentation. Bien que, vis-à-vis des interactions, la majorité des élèves se sont montrés d'une efficacité équivalente, il n'en a pas été de même en ce qui concerne la performance pédagogique. Cela justifie l'utilisation d'une approche scénaristique malléable autorisant par exemple les enseignants à complexifier l'activité ou à simplifier les tâches pour les élèves entrant dans le cursus.

Concernant l'exploitation de l'outil par les enseignants, nous avons vu qu'il existe plusieurs approches qui se justifient au cas par cas. Notre expérimentation n'a pas mis en avant une méthode par rapport à une autre, au contraire cela nous a permis de souligner l'intérêt de proposer aux enseignants plusieurs méthodes pédagogiques qu'il convient de prévoir au moment de la conception et de l'implémentation. Les différentes hypothèses et les interprétations des résultats sont synthétisées dans le tableau 6.9.

Hypothèses	Résultats	Causes / Interprétations
H0 : L'entretien d'explicitation est préféré par les enseignants plutôt que l'observation de l'apprenant	Non validée	Le contexte pédagogique influence le choix de la méthode
H1 : Il n'y a pas de différence dans les usages de l'outil virtuel entre les différentes classes	Validée	
H2 : Il n'y a pas de différence dans les usages de l'outil virtuel entre les différents établissements	Validée	
H3 : Les apprenants de haut niveau (Terminale) réussissent mieux la tâche que les apprenants novice (Secondes, CAP)	Non validée	Le profil et l'expérience des élèves influencent la réussite de la tâche
H4 : Les apprenants de haut niveau sont plus rapides que les autres (Tales > 1ères > 2ndes > CAP)	Non validée	La découverte de l'outil, des interactions et de l'EV biaise la vitesse de réalisation liée aux compétences des apprenants
H5 : La tablette virtuelle est correctement utilisable par les élèves	Validée	
H6 : La téléportation ne cause pas de cybermalaises	Validée	

TABLEAU 6.9 – Récapitulatif des hypothèses de l'expérimentation.

Cette utilisation concrète de la technologie dans les lycées professionnels n'est pas encore suffisamment documentée dans la littérature, notamment car les processus expérimentaux se révèlent longs et complexes. De plus, les conditions expérimentales requièrent une population conséquente de manière à prendre en compte plusieurs profils d'élèves. Nous avons vu que des différences existent entre les établissements d'un point de vue pédagogique, que ce soit dans les pratiques des enseignants ou celles des élèves. Au sein même des lycées, il subsiste des différences entre les élèves et il convient pour l'expérimentateur de considérer cela afin d'avoir les résultats les plus pertinents possibles. L'approche expérimentale doit également impliquer directement les enseignants. Par exemple, nous avons observé que les résultats expérimentaux contribuent à améliorer la démarche pédagogique des enseignants, notamment à propos de l'évaluation. Ceux-ci peuvent en effet mieux comprendre et proposer des démarches expérimentales pour diversifier les pratiques d'exploitation pédagogique.

TROISIÈME PARTIE

Perspectives et conclusion

CONCLUSION GÉNÉRALE

7.1 Contexte et objectifs de recherche

Cette thèse traite de la problématique de l'utilisation et de la pertinence de la RV dans le contexte de la formation professionnelle. Plusieurs aspects sont abordés, (1) la conception de scénarios pédagogiques, (2) la conception d'environnements virtuels et (3) l'utilisation et l'évaluation de l'outil en contexte réel.

Dans une application destinée à la formation professionnelle, il est essentiel de prendre en compte ces trois axes, car ils sont indispensables à l'élaboration d'une activité pédagogique pertinente pour les enseignants et les apprenants. Nous avons considéré que la conception du scénario pédagogique était la pierre angulaire de toute la simulation pédagogique.

Pour la formation professionnelle, il faut en outre considérer les spécificités telles que les référentiels des diplômes ou encore les spécificités des filières qui peuvent être différentes dans les objectifs pédagogiques. Ainsi, il n'est pas possible de proposer une approche universelle de conception d'activités pédagogiques pour tous les domaines. Chacun d'entre eux possède en effet ses propres spécificités, que ce soit des procédures particulières, des éléments précis d'évaluation ou encore des profils d'apprenants différents demandant une considération spécifique.

L'inconvénient des méthodes présentées dans la littérature réside dans la difficulté d'application au monde de la formation professionnelle des approches discutées. Parfois en raison d'éléments trop techniques, ou alors la présence de méthodes trop rigides ne correspondant pas aux attentes des enseignants.

L'axe lié à la conception d'environnements virtuels pédagogiques est également

un élément important que l'on traite dans cette contribution. Dans ce contexte, les techniques d'interaction et de création contribuent à une industrialisation efficace du processus de conception. Pour la formation professionnelle, il faut des situations virtuelles qui soient aisément utilisables à la fois par les enseignants, mais aussi par les apprenants. L'ergonomie des outils et l'étayage (simplification) des actions sont des moyens efficaces permettant d'accompagner l'apprenant dans la réalisation d'une activité pédagogique sans pour autant monopoliser une trop grande quantité de ressources cognitives liées à l'utilisation de l'outil lui-même. Ce travail d'optimisation des tâches virtuelles requiert des expérimentations sur le terrain avec les apprenants et les enseignants.

Le dernier volet de ces travaux de thèse repose sur l'exploitation et l'évaluation pédagogique et concrète de l'outil au sein des classes. En effet, dans la littérature, les méthodes d'évaluation peuvent être basées sur l'exploitation des données objectives enregistrées par l'outil. Pour notre cas d'étude, la formation professionnelle, ces éléments ne suffisent pas à favoriser l'utilisation des outils par l'apprenant, car il faut prendre en compte les spécificités du terrain. À savoir les méthodes pédagogiques des enseignants, le profil des élèves, de même que les différences significatives qu'il peut y avoir entre les différents établissements. Ces éléments sont cruciaux pour les enseignants, et ne pas les prendre en compte peut mener à une mauvaise utilisation voire une non-utilisation des outils virtuels proposés, car ils ne sont pas forcément adaptés aux besoins réels.

7.2 Conception de scénarios pédagogiques

La RV appliquée à la formation professionnelle requiert des approches nouvelles de conception afin de correspondre plus précisément aux besoins des différentes filières professionnelles. Nous avons détaillé dans ce manuscrit une méthode permettant d'extraire des tâches et des compétences à partir des référentiels de diplômes officiels afin de procéder à une transposition en RV. Nous insistons sur le fait que cette méthode est spécifique aux filières professionnelles dispensées dans les lycées. Nous ne savons pas si cela peut être transposé dans les filières générales, mais dans ces cas précis, il nous faut expérimenter afin de confronter nos résultats avec les approches de concep-

tion décrites dans la littérature.

Nous avons évoqué une différence entre les filières de la formation professionnelle, notamment avec l'exemple du Bac Pro Commerce et des approches plus techniques des filières STI2D. Ici nous avons deux méthodes de raisonnement différentes à cause des spécificités de chaque métier. Dans le tertiaire, les relations humaines sont plus importantes et vont préférer des approches conceptuelles fondées sur les expériences métiers et des démarches plus créatives. Alors que pour les filières techniques, les procédures normalisées servent de fil conducteur. Dans le premier exemple (tertiaire), cela permet d'avoir une plus grande marge de manœuvre au moment de la conception pédagogique, car les activités peuvent avoir plusieurs cheminements possibles. Pour le second exemple (filières STI2D), l'utilisation de procédures est un réel avantage, car tous les intervenants peuvent construire autour de cette base commune qui est maîtrisée par tous. Pour le concepteur, cela autorise une projection dans le monde virtuel plus simple. Néanmoins, cette approche peut se révéler rigide, c'est pourquoi il faut que le développeur fasse preuve de flexibilité en n'imposant pas une méthode générique de conception.

7.3 Implémentation du scénario virtuel

De manière générale, notre proposition de conception permet de s'adapter à plusieurs domaines professionnels, notamment grâce à la capitalisation des résultats et des expériences. Le développeur peut changer quelques étapes de manière à améliorer le processus de conception des activités virtuelles, cela peut s'effectuer au cas par cas, en fonction de la situation pédagogique à transposer en virtuel.

Grâce à l'approche générique proposée, une situation pédagogique utilise majoritairement les mêmes ressorts techniques (briques logicielles) qu'une activité d'une autre filière. Par exemple les modalités d'interaction, le déplacement ou encore le processus d'évaluation. L'approche générique est selon nous un élément essentiel pour pouvoir procéder à une conception efficace de situations pédagogiques virtuelles. Chaque élément logiciel doit pouvoir remplir un rôle spécifique et être utilisé dans d'autres situations sans que le concepteur ait à coder de nouveaux éléments.

Nous proposons dans ce manuscrit un processus d'étayage permettant à l'apprenant de réaliser des interactions complexes tout en effectuant un nombre minimal d'interactions pour une tâche donnée (Verhulst, 2019). Voire dans le cas des interactions depuis la tablette virtuelle, un étayage fort qui transforme intégralement une interaction pour la rendre simple d'utilisation. Cette réduction de complexité est également d'ordre cognitif pour l'apprenant grâce à la suppression de certaines actions intermédiaires sans impact sur la logique de l'action pédagogique.

Notre proposition d'approche générique contribue également à garantir une équivalence entre plusieurs situations virtuelles, c'est-à-dire que les interactions restent inchangées d'une application à l'autre. Cela contribue à améliorer le potentiel d'utilisabilité au sein d'un établissement scolaire, où lorsqu'une interaction est maîtrisée, ce savoir peut être réutilisé sans temps d'adaptation dans une autre situation virtuelle. Cette approche est également intéressante lors d'expérimentations, où cette consistance des interactions garantit des situations comparables et équivalentes.

7.4 Exploitation pédagogique de scénarios virtuels

Nous avons évoqué dans ce manuscrit les différents moyens d'exploitation pédagogiques de la RV en contexte de formation professionnelle. Pour que la RV soit utilisée sur le terrain, il est impératif de prendre en compte les modalités d'utilisation en classe. Nous avons tout d'abord proposé une exploitation en trois étapes. La première réside dans une préparation de la session virtuelle. Ceci est réalisé en expliquant le contexte, ou alors en amenant la RV comme étant une conséquence d'un travail effectué en dehors, sur table ou lors de travaux pratiques. Nous accordons une importance particulière à cette première étape, car elle consiste à familiariser l'apprenant à la situation virtuelle, réduisant ainsi le temps passé en immersion, de même qu'à justifier plus précisément la pertinence de l'usage de la situation virtuelle. En effet, nous avons évoqué que la temporalité d'une situation virtuelle est cruciale pour les enseignants, car dans certains cas, les effectifs par classe sont importants, limitant la disponibilité de l'outil virtuel. Il est en effet compliqué pour les établissements d'investir dans un casque de RV par apprenant. De plus, l'apprenant ne peut pas se permettre de passer trop

de temps à apprendre l'outil ou découvrir la tâche à effectuer. C'est pourquoi, pour une utilisation pédagogique, il est intéressant que les activités virtuelles soient dans la continuité des activités déjà présentes dans le cursus, de manière à pouvoir intégrer efficacement l'outil numérique au sein de la classe. Cette notion de découverte est néanmoins appropriée, car il faut que l'apprenant puisse apprendre comment interagir dans l'EV. C'est pourquoi nous mettons en avant l'intérêt de mettre en place une activité dite de démarrage, qui allie la découverte des interactions avec une activité pédagogique. De cette manière, l'apprenant peut découvrir en autonomie l'EV tout en effectuant une activité pédagogique simple. Pour l'enseignant cette préparation est également virtuelle, notamment grâce à notre proposition de variables didactiques, autorisant un enseignant à mettre en place une situation pédagogique adaptée aux profils des élèves. Cela permet à l'enseignant de faire varier certains éléments de l'activité pédagogique, de manière à adapter le déroulé de l'activité en fonction du niveau de l'apprenant ainsi que de sa classe. Nous mettons en avant cette approche de personnalisation afin d'améliorer l'usage et la pertinence de la RV sur le terrain. Comme nous l'avons vu lors de l'expérimentation, les profils des apprenants peuvent être très hétérogènes, même au niveau d'une classe, c'est pourquoi cette notion d'adaptation et de flexibilité de la situation pédagogique est si importante pour les enseignants. La préparation des variables didactiques s'effectue par le biais d'interfaces graphiques intégrées à l'application virtuelle sur lesquelles un enseignant peut renseigner les éléments à inclure dans le fichier de variable didactique en cours d'édition. Grâce à cette approche, une activité peut être utilisée pour plusieurs contextes pédagogiques, définis au préalable par l'enseignant.

Lors de l'expérimentation que nous avons menée à propos des deux méthodes d'évaluation d'une situation virtuelle, à savoir l'observation en temps réel et l'entretien a posteriori, nous avons trouvé qu'il n'existe pas de consensus pour les enseignants. Cela signifie que les modalités d'exploitation pédagogique évoluent en fonction du contexte de l'établissement, des classes, et également en fonction du profil des élèves. Il est donc primordial d'introduire un fort degré de flexibilité dans les usages de la RV avec les apprenants, de manière à autoriser plusieurs approches pédagogiques. Grâce à cela, l'enseignant a également toutes latitudes pour créer de nouvelles méthodes d'exploitation en accord avec ses exigences pédagogiques. Cela peut par exemple être sur l'organisation des entretiens d'explicitation en groupe ou en auto-

mie (Verkuyl *et al.*, 2018; Roh *et al.*, 2016). Une erreur de conception serait de fournir une application de RV avec une seule méthode d'exploitation sans possibilité pour les enseignants de modifier l'usage de l'outil pour correspondre à leurs attentes. Dans de tels cas, la RV n'a pas d'intérêt, alors qu'en donnant la possibilité aux enseignants de gérer eux-mêmes les observations et les évaluations, le concepteur s'assure d'une accessibilité accrue de l'outil dans différents contextes.

L'approche par compétence utilisée en formation professionnelle implique d'adapter la méthode d'évaluation. En effet, dans notre cas d'étude, nous ne sommes pas en mesure de proposer une évaluation automatisée donnant lieu à une note en fin d'activité. Une approche de la sorte rendrait incompatible l'outil virtuel avec la formation professionnelle. Celle-ci n'autorise pas forcément le dialogue entre l'apprenant et l'enseignant, ce qui est un frein à la progression, car la notation prend le dessus par rapport à l'aspect formatif de la RV. Nous recommandons donc l'utilisation d'indicateurs de performances, qui tirent profit des capacités d'observation permanente du système en renseignant l'état de certaines actions sans prise de position sur la validité de l'action observée. L'attribution de notes est également selon nous un frein à la flexibilité des contextes virtuels, car cela implique de réduire les possibilités interactives afin de garantir une justesse de notation et une reproductibilité efficace. Or dans une approche par compétences en formation professionnelle, la diversité des situations et le contexte sont des éléments qui rendent l'utilisation de la RV pertinente. Nous pouvons cependant nuancer cela pour certaines filières, notamment dans les milieux plus techniques utilisant des procédures précises où il est plus aisé de statuer sur la validité d'une tâche, surtout s'il s'agit d'un élément de sécurité critique comme la coupure d'un disjoncteur par exemple. Dans de tels cas, il est possible pour le système de dire qu'il s'agit d'une erreur, mais cette situation n'est pas généralisable dans tous les contextes.

L'exploitation des indicateurs de performances proposée dans ce manuscrit peut reposer sur plusieurs modalités. Par exemple, cela peut être la mise en place d'un entretien d'explicitation post-virtuel permettant aux apprenants de justifier leurs choix et d'explicitier le cheminement logique et mental qui a mené à la réalisation de la tâche virtuelle. Dans d'autres contextes, cela peut être une exploitation collective de ces données virtuelles, avec des travaux en groupe, ou alors un débriefing à l'échelle d'une classe. Dans de tels cas, les résultats d'une session virtuelle peuvent servir de sup-

port à un cours classique avec une classe entière. C'est-à-dire que les données issues du virtuel peuvent être exploitées sans l'outil, que ce soit sur table, en classe entière ou même sur les plateaux techniques lors des sessions de travaux pratiques. Nous pouvons également souligner que l'utilisation concrète de la RV est l'élément le plus problématique pour les enseignants. En effet, avant de s'aventurer sur les sentiers de la technique ou de la méthodologie conceptuelle, les enseignants souhaitent d'abord savoir comment utiliser l'outil, et nous avons constaté que cela n'est pas suffisamment étudié dans la littérature scientifique, où des méthodes de conception pédagogique ainsi que des outils auteurs peuvent être décrits, au détriment d'un intéressement à propos des utilisations concrètes de cette technologie au sein des établissements. Il n'y a en effet pas de réticence spécifique à la technologie de la RV, cela concerne l'ensemble des nouvelles technologies (Hodas, 1996), il manque juste aux enseignants des éléments précis et tangibles leur permettant de se projeter dans une utilisation concrète de la RV avec leurs élèves, et ce, quel que soit l'établissement ou le profil des élèves. Par ailleurs, si l'outil ne convient pas à tous les profils d'élèves au sein d'une classe, alors ce dernier peut ne pas être utilisé, car laisser de côté des élèves n'est pas acceptable ni même éthique.

7.5 Synthèse des contributions

Nous pouvons synthétiser nos contributions de la manière suivante :

- Proposition d'une approche globale de conception d'application de RV appliquée à la formation professionnelle (Figure 5.1, sous-section 5.1.3). Cette approche est mise en parallèle avec les problématiques de conception liées à la diversité des filières de la formation professionnelle. Cette diversité permet de comprendre pourquoi certaines approches fonctionnent dans un domaine, mais pas dans un autre. Ce qui implique l'adoption de méthodes de conception plus flexibles, mais qui peuvent se montrer plus complexes à formaliser.
- Mise en place d'une approche par étayage des interactions virtuelles (sous-section 4.1.2) afin d'améliorer l'efficacité pédagogique d'une application (Figure 4.5).

- Proposition d'un outil, la tablette virtuelle, support à l'accompagnement de l'apprenant ainsi que contenant des interactions simplifiées (étayage dit « fort ») (sous-section 4.3.1). Cette simplification permet de réduire l'importance de certaines actions à faible valeur ajoutée pédagogique au profit des éléments pertinents pour l'apprentissage visé.
- Proposition d'une approche générique d'implémentation des interactions virtuelles (section 4.1). Les briques logicielles réutilisables permettent une mutualisation des développements ainsi qu'une optimisation du temps de développement de nouvelles activités virtuelles. La mise en place de briques génériques est également bénéfique lors de la mise à jour d'activités virtuelles à la suite, par exemple, d'une réforme de référentiel, ou alors pour assurer une maintenabilité en fonction des retours des enseignants. Pour l'utilisateur, cela garantit une équivalence des actions entre différentes applications, réduisant ainsi le temps d'apprentissage pour les apprenants et les enseignants.
- Paramétrisation des activités pédagogiques par l'enseignant (section 5.2). Nous proposons un module d'activité permettant à l'enseignant de venir agir sur des variables didactiques, lui permettant ainsi d'adapter la situation virtuelle à un contexte précis ou un type de profil d'apprenant spécifique. Cette approche évite pour l'enseignant de se retrouver en présence d'un scénario pédagogique trop rigide et donc inutilisable pour ses enseignements.
- Proposition d'une méthode d'accompagnement (la guidance) de l'apprenant (sous-section 4.3.3). Les apprenants vont être régulièrement dans une situation de découverte de la RV et de la situation pédagogique. Notamment à cause des contraintes temporelles rencontrées sur le terrain et de l'accès à l'équipement virtuel qui peut être unique au sein des établissements. Notre proposition est donc un module générique permettant de segmenter les activités pédagogiques et d'expliquer chaque étape à l'apprenant. Ces explications comportent trois niveaux de granularité en fonction du niveau de l'apprenant, à savoir novice, intermédiaire et avancé. L'objectif de ce découpage est de faire correspondre plus précisément le tutoriel au niveau des apprenants.

- Nos propositions ont été implémentées et testées dans trois applications complètes, une à destination de la filière des métiers du Commerce et de la Vente (section 6.1), une autre pour le Pilotage de Ligne de Production (sous-section 6.2.1) ou encore une situation de revue de chantier (sous-section 6.2.2). Mettre en place des situations complètes est une nécessité pour pouvoir expérimenter sur le terrain.

7.6 Perspectives proposées

7.6.1 Création d'activité pédagogique

Nous pensons qu'une approche complémentaire basée sur le principe de cartes à jouer pour concevoir des scénarios pédagogiques présentés dans Mariais (2012) (*ScenLRPG*) peut être pertinente pour notre cas d'étude. En effet, les réunions de travail se déroulent parfois dans des salles qui ne sont pas équipées convenablement en outils informatiques. Ce qui peut poser des problèmes pour utiliser des ressources informatiques pour assister la conception d'activité pédagogique (ex. : *LEGADDE* (Marfisi-Schottman, 2012) ou *APPLiq* (Marne, 2014)). Par ailleurs, nous avons constaté pour certains projets que l'approche intégralement numérique pouvait couper le dialogue, car chaque participant est occupé à interagir avec son ordinateur ou sa tablette. Les approches de créativité utilisées dans le milieu de l'innovation sont intéressantes, car cela permet de prendre une certaine distance avec les référentiels ou d'autres documents formels dans la première phase de conception pédagogique. De plus, certaines filières construisent les compétences et tâches pédagogiques en utilisant des formalismes comme l'utilisation de verbes d'action pour décrire une tâche pédagogique. L'utilisation d'une approche similaire à celle proposée par Mariais (2012) peut permettre aux enseignants de créer eux-mêmes leurs séquences d'actions lors des réunions avec le concepteur. Par la suite, il peut être envisageable de mettre en commun les séquences ou alors de construire en groupe les séquences, puis de mettre cela en parallèle du référentiel afin de déterminer si un séquençement d'actions est pertinent pour l'activité pédagogique ciblée. Nous pensons que cette approche peut être plus productive que le simple fait de remplir une grille normalisée qui, indirectement, impose des règles et des limitations qui peuvent être un frein à la créativité. Il ne

faut pas perdre de vue que la RV est également un bon moyen pour mettre en place des situations professionnelles qui sortent de l'ordinaire, et pour arriver à un tel résultat, une réflexion créative peut être nécessaire.

Pour aller plus loin dans cette démarche de conception de scénario pédagogique, nous proposons d'expérimenter notre approche générale dans d'autres filières afin de pouvoir améliorer notre proposition de méthodologie de conception. Nous pensons également que les avancées technologiques et l'accès au grand public de la RV vont améliorer ce processus d'écriture des activités pédagogiques. En effet, concevoir un scénario sans réellement avoir d'exemples tangibles ou d'expériences avec la RV constitue un frein non négligeable pour les enseignants. C'est pourquoi cette capitalisation des résultats et la communication des possibilités de cette technologie peuvent favoriser le processus de conception de scénario pédagogique.

7.6.2 Suivi du parcours pédagogique

Dans les établissements scolaires, les enseignants utilisent actuellement des logiciels tels que des LMS pour créer des activités ou encore suivre l'avancement des apprenants dans l'acquisition de compétences. Ces outils numériques sont maintenant présents dans tous les établissements, et nous avons observé que pour qu'un nouvel outil numérique soit adopté et accepté, il est préférable que celui-ci soit compatible avec les outils existants. En effet, si les enseignants doivent renseigner plusieurs fois les classes et les noms des apprenants, cela n'est pas efficient. Dans le cas de la RV, il serait intéressant de pouvoir proposer un lien avec les LMS par exemple de manière à synchroniser les traces des sessions virtuelles directement avec le profil numérique des apprenants (Vermeulen, 2018; Torrente *et al.*, 2009). Cela peut être effectué grâce à un connecteur SCORM (Dodds, 2001), liant ainsi l'application virtuelle aux outils numériques des établissements. De cette manière, les enseignants peuvent avoir accès aux données depuis d'autres postes informatiques que celui qui est utilisé pour réaliser les sessions virtuelles. Cela peut faciliter l'usage des traces dans d'autres contextes tels qu'un débriefing en classe entière dans une salle de cours classique. Ce lien avec un LMS peut nous permettre d'effectuer un suivi plus précis de la progression des apprenants lors de l'usage de la RV. Grâce à ce lien avec un LMS, nous pouvons mettre

en place une expérimentation à l'échelle d'une année scolaire dans plusieurs établissements, pour avoir plus d'informations à propos des profils d'apprenants, ainsi que les différences éventuelles entre les établissements et les classes d'apprenants. En effet, l'organisation des sessions expérimentales dans les filières professionnelles constitue un frein conséquent en raison de la disponibilité des enseignants et des apprenants, ce qui limite le nombre de sessions expérimentales possibles. En autorisant une remontée des traces et des évaluations vers un LMS, nous pouvons étudier plus précisément les usages concrets de la RV en contexte réel de formation.

GLOSSAIRE

action Consiste en une interaction à effectuer dans le monde virtuel. Par exemple, prendre un objet.

activité pédagogique virtuelle Une activité, ou tâche pédagogique virtuelle est un ensemble d'actions qui constituent un contexte précis de formation. Par exemple, une activité de mise en rayon.

brique (logicielle) Élément informatique générique servant à la conception d'un environnement virtuel.

contrôleur Aussi appelé « manettes », il s'agit du moyen d'action reliant l'utilisateur à la machine.

didactique professionnelle Analyse du travail en vue de la formation des compétences (Pastré, 2002).

guidance Méthode informatique permettant d'accompagner un apprenant dans la découverte d'une activité pédagogique.

interaction Il s'agit des moyens d'action sur l'environnement virtuel réalisés par l'utilisateur.

logs En informatique, les *logs* sont des fichiers stockant l'historique de certaines actions ou alors données brutes générées par l'application utilisée.

maquette pédagogique Équipement réel permettant à un apprenant de mettre en pratique ses connaissances. Cette activité s'effectue dans le cadre des travaux pratiques sur le plateau technique.

modèle Il s'agit d'une représentation simplifiée d'informations permettant de décrire une situation, un phénomène ou un concept. Un modèle met en avant des données, des actions et des liens logiques permettant de donner une cohérence au modèle.

métamodèle Il s'agit d'un modèle qui est utilisé pour représenter d'autres modèles.

plateau technique Lieu dans un établissement où les apprenants effectuent les travaux pratiques.

référentiel Document officiel décrivant un diplôme.

technique de navigation Regroupe l'ensemble des techniques permettant à l'utilisateur de se mouvoir dans le monde virtuel.

traces Les traces constituent l'ensemble des données issues d'une session pédagogique pour un utilisateur donné. Il peut s'agir de logs ou encore de rapports d'activités exploitables par l'enseignant.

Unity3D Logiciel utilisé pour le développement d'applications de réalité virtuelle.

étayage Principe de simplification d'une action pour la rendre plus simple et rapide à utiliser pour l'apprenant.

ACRONYMES

EEP Entreprise d'Entrainement Pédagogique.

EN Éducation Nationale.

EV Environnement Virtuel.

LG Learning Game.

LMS Learning Management System.

LRPG Learning Role-Playing Game (Mariais, 2012).

MELEC Métiers de l'Électricité et de ses Environnements Connectés.

PLP Pilotage de Ligne de Production.

PLV Publicité sur le Lieu de Vente.

RV Réalité Virtuelle.

SG Serious Game.

STI2D Sciences et Technologies de l'Industrie et du Développement Durable.

TP Travaux Pratiques.

BIBLIOGRAPHIE

- Al-Azawei, A., Baiee, W. R., et Mohammed, M. A. (2019). Learners' Experience Towards E-Assessment Tools : A Comparative Study on Virtual Reality and Moodle Quiz. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET)*, 14(05) :34.
- Alaterre, C., Duceau, B., Sung Tsai, E., Zriouel, S., Bonnet, F., Lescot, T., et Verdonk, F. (2020). Virtual Reality for PEripheral Regional Anesthesia (VR-PERLA Study). *Journal of clinical medicine*, 9(1).
- Arnaldi, B., Fuchs, P., et Tisseau, J. (2003). Chapitre 1 du volume 1 du traité de la réalité virtuelle. *Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris*, 1 :131.
- Backhaus, N., Trapp, A. K., et Thüring, M. (2018). Skeuomorph versus flat design : User experience and age-related preferences. In *Lecture Notes in Computer Science (including sub-series Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, volume 10919 LNCS, pages 527–542.
- Bannert, M. (2009). Promoting Self-Regulated Learning Through Prompts. *Zeitschrift fur Pädagogische Psychologie*, 23(2) :139–145.
- Barot, C. (2014). *Scénarisation d'environnements virtuels. Vers un équilibre entre contrôle, cohérence et adaptabilité*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne.
- Barot, C., Lourdeaux, D., et Lenne, D. (2013). Using planning to predict and influence autonomous agents behaviour in a virtual environment for training. In *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Cognitive Informatics and Cognitive Computing, ICCI*CC 2013*, pages 274–281.
- Barthes, J., Wanderley, G., Lacaze-Labadie, R., et Lourdeaux, D. (2018). Designing Training Virtual Environments Supported by Cognitive Agents. *IEEE 22nd International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design*, pages 307–312.
- Beaubien, J. M. et Baker, D. P. (2003). Post-Training Feedback : The Relative Effectiveness of Team- versus Instructor-Led Debriefs. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 47(19) :2033–2036.

-
- Becchetti-Bizot, C. (2017). Repenser la forme scolaire à l'heure du numérique. Technical report, Inspection Générale de l'Éducation Nationale.
- Bell, J. T. et Fogler, H. S. (2004). The application of virtual reality to (chemical engineering) education. In *Proceedings - Virtual Reality Annual International Symposium*, volume 29, pages 217–218.
- Berg, L. P., Vance, J. M., et Vance, J. M. (2017). Industry use of virtual reality in product design and manufacturing : a survey. *Virtual Reality*, 21(1) :1–17.
- Bevan, N. (2008). UX, usability and ISO standards. *The 26th Annual CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1–5.
- Boet, S., Bould, M. D., Bruppacher, H. R., Desjardins, F., Chandra, D. B., et Naik, V. N. (2011). Looking in the mirror : Self-debriefing versus instructor debriefing for simulated crises. *Critical Care Medicine*, 39(6) :1377–1381.
- Boet, S., Dylan Bould, M., Sharma, B., Revees, S., Naik, V. N., Tribby, E., et Grantcharov, T. (2013). Within-team debriefing versus instructor-led debriefing for simulation-based education : A randomized controlled trial. *Annals of Surgery*, 258(1) :53–58.
- Boletsis, C. (2017). The New Era of Virtual Reality Locomotion : A Systematic Literature Review of Techniques and a Proposed Typology. *Multimodal Technologies and Interaction*, 1(4) :24.
- Bourgouin, M.-L. (2017). L'usage du numérique dans la formation des vendeurs de niveau baccalauréat professionnel « Commerce ». Mémoire de master, Université d'Angers.
- Bowen, Z., Jun, Y., Jia, G., Junbo, W., Yuxin, Z., et Ming, Y. (2019). Using Virtual Reality for the Training of Physical Protection System in Nuclear Power Plant. In *2018 International Conference on Power System Technology, POWERCON 2018 - Proceedings*, pages 4806–4810. IEEE.
- Bowman, D. A. et Hodges, L. F. (1997). An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments. *Proceedings of the 1997 symposium on Interactive 3D graphics - SI3D '97*, pages 35–ff.
- Bowman, D. A., Koller, D., et Hodges, L. F. (1997). Travel in immersive virtual environments : an evaluation of viewpoint motion control techniques. *Proceedings of IEEE 1997 Annual International Symposium on Virtual Reality*, pages 45–52,.
- Bowman, D. A., Kruijff, E., LaViola, J. J., et Poupyrev, I. (2001). An introduction to 3-D user interface design. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 10(1) :96–108.

-
- Bozgeyikli, E., Raji, A., Katkooi, S., et Dubey, R. (2016). Point & Teleport Locomotion Technique for Virtual Reality. *Proceedings of the 2016 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play - CHI PLAY '16*, pages 205–216.
- Brassard, C. et Daele, A. (2003). Un outil réflexif pour concevoir un scénario pédagogique intégrant les TIC. *Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH'2003)*.
- Brooke, J. et Weerdmeester, A. (1996). SUS-A quick and dirty usability scale". Usability evaluation in industry, B. Thomas and. *Usability evaluation in industry*, pages 189–194 SRC – GoogleScholar FG – 0.
- Buche, C., Querrec, R., de Loor, P., et Chevaillier, P. (2004). MASCARET : A Pedagogical Multi-Agent System for Virtual Environments for Training. *International Journal of Distance Education Technologies (IJDET)*, 2(4) :41–61.
- Bulu, S. T. (2012). Place presence, social presence, co-presence, and satisfaction in virtual worlds. *Computers and Education*, 58(1) :154–161.
- Burdea, G. et Coiffet, P. (1994). *Virtual reality technology*. John Wiley & Sons.
- Burdea, G., Patounakis, G., Popescu, V., et Weiss, R. E. (1999). Virtual reality-based training for the diagnosis of prostate cancer. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 46(10) :1253–1260.
- Burmistrov, I., Zlokazova, T., Izmalkova, A., et Leonova, A. (2015). Flat design vs traditional design : Comparative experimental study. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, volume 9297, pages 106–114.
- Cahour, B. et Falzon, P. (1991). Assistance à l'opérateur et modélisation de sa compétence. *Intellectica. Revue de l'Association pour la Recherche Cognitive*, 12(2) :159–186.
- Calvez, C. et Régis, M. (2018). La voie professionnelle scolaire. Technical report, Ministère de l'Éducation Nationale.
- Çamcı, A. (2019). Exploring the effects of diegetic and non-diegetic audiovisual cues on decision-making in virtual reality. In *Proceedings of the Sound and Music Computing Conferences*, pages 195–201.
- Carré, P. et Pierre, C. (2000). Traité des sciences et des techniques de la formation. *Formation Emploi*, 69(1) :72–72.

-
- Chamaret, D. (2010). *Plate-forme de réalité virtuelle pour l'étude de l'accessibilité et de l'extraction de lamps sur prototype virtuel automobile*. Thèse, Université d'Angers.
- Checa, D. et Bustillo, A. (2020). Advantages and limits of virtual reality in learning processes : Briviesca in the fifteenth century. *Virtual Reality*, 24(1) :151–161.
- Cho, M., Kwon, S., Na, N., Lee, K. P., et Suk, H. J. (2015). The elders preference for skeuomorphism as app icon style. In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, volume 18, pages 899–904.
- Christou, C. G. et Aristidou, P. (2017). Steering Versus Teleport Locomotion for Head Mounted Displays. *Avr 2017*, 10325(March) :431–446.
- Clergeaud, D., Guillaume, F., et Guitton, P. (2016). 3D collaborative interaction for aerospace industry. *2016 IEEE 3rd VR International Workshop on Collaborative Virtual Environments, 3DCVE 2016*, pages 13–15.
- Coomer, N., Clinton, W., Bullard, S., et Williams-Sanders, B. (2018). Evaluating the effects of four VR locomotion methods : Joystick, arm–cycling, point–tugging, and teleporting. In *Proceedings - SAP 2018 : ACM Symposium on Applied Perception*, pages 1–8.
- Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., et DeFanti, T. A. (1993). Surround-screen projection-based virtual reality. *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '93*, pages 135–142.
- Cziksentmihalyi, M. (1990). *Flow : The Psychology of Optimal Experience*, volume 1990. Harper & Row New York.
- Davis, M. M., Gabbard, J. L., Bowman, D. A., et Gracanin, D. (2016). Depth-based 3D gesture multi-level radial menu for virtual object manipulation. In *Proceedings - IEEE Virtual Reality*, volume 2016-July, pages 169–170.
- Dodds, P. (2001). Sharable Content Object Reference Model (SCORM) : The SCORM Content Aggregation Model. Technical report, ADL.
- Fabola, A. et Miller, A. (2016). Virtual Reality for Early Education : A study. In *Communications in Computer and Information Science*, pages 75–88.
- Fagerholt, E. et Lorentzon, M. (2009). Beyond the HUD. User Interfaces for Increased Player Immersion in FPS Games. *Chalmers University*, page 124.

-
- Foloppe, D. A., Richard, P., Yamaguchi, T., Etcharry-Bouyx, F., et Allain, P. (2018). The potential of virtual reality-based training to enhance the functional autonomy of Alzheimer's disease patients in cooking activities : A single case study. *Neuropsychological Rehabilitation*, 28(5) :709–733.
- Fuchs, P. (2016). *Les casques de réalité virtuelle et de jeux vidéo*. Presses des MINES.
- Fuchs, P., Moreau, G., et Papin, J. P. (2001). *Le traité de la réalité virtuelle, première édition*. les Presses de l'École des Mines de Paris.
- Funk, M., Müller, F., Fendrich, M., Shene, M., Kolvenbach, M., Dobbertin, N., Günther, S., et Mühlhäuser, M. (2019). Assessing the Accuracy of Point & Teleport Locomotion with Orientation Indication for Virtual Reality using Curved Trajectories. In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*.
- Gac, P., Richard, P., Papouin, Y., George, S., et Richard, É. (2019). Virtual interactive tablet to support vocational training in immersive environment. *VISIGRAPP 2019 - Proceedings of the 14th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*, 2 :145–152.
- Galand, B., Bourgeois, E., Frenay, M., et Bentein, K. (2008). Apprentissage par problème et apprentissage coopératif : vers une intégration fructueuse ? *Vers des apprentissages en coopération : rencontres et perspectives*, pages 139–164.
- Gallagher, A. G., Ritter, E. M., Champion, H., Higgins, G., Fried, M. P., Moses, G., Smith, C. D., et Satava, R. M. (2005). Virtual Reality Simulation for the Operating Room. *Annals of Surgery*, 241(2) :364–372.
- Galloway, A. R. (2006). *Gaming : Essays on algorithmic culture*, volume 18. U of Minnesota Press.
- Gebhardt, S., Pick, S., Leithold, F., Hentschel, B., et Kuhlen, T. (2013). Extended pie menus for immersive virtual environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19(4) :644–651.
- George, S. (2011). *Interactions et communications contextuelles dans les environnements informatiques pour l' apprentissage humain*. Thèse de doctorat, INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon I.
- Ghosh Dastider, S. (2019). Effectiveness of Virtual Reality Technology to teach Gen Z students about Construction Safety : A Pilot Study. *International Journal of Scientific Research and Management*, 7(02) :1–9.

-
- Goesele, M. et Stuerzlinger, W. (1999). Semantic Constraints for Scene Manipulation. *Spring Conference in Computer Graphics '99*, pages 140–146.
- Górski, F., Bun, P., Wichniarek, R., Zawadzki, P., et Hamrol, A. (2017). Effective design of educational virtual reality applications for medicine using knowledge-engineering techniques. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 13(2) :395–416.
- Grosjean, J. et Coquillart, S. (2001). Command & Control Cube : a Shortcut Paradigm for Virtual Environments. In *Immersive Projection Technology and Virtual Environments 2001*, pages 1–12. Springer.
- Guéraud, V., Pernin, J.-P., Cagnat, J.-m., et Cortès, G. (1999). Environnements d'apprentissage basés sur la simulation. Outils auteur et expérimentations. *Sciences et techniques éducatives*, 6(1) :95–141.
- Guigue-Durning, M. (1996). L'entretien d'explicitation en formation initiale et continue. *Recherche & Formation*, 22(1) :148–150.
- Hassenzahl, M. (2008). User experience (UX). In *Proceedings of the 20th International Conference of the Association Francophone d'Interaction Homme-Machine on - IHM '08*, page 11, New York, New York, USA. ACM Press.
- Held, R. M. et Durlach, N. I. (1992). Telepresence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1) :109–112.
- Hocine, N., Gouaich, A., et Cerri, S. A. (2014). Dynamic Difficulty Adaptation in Serious Games for Motor Rehabilitation. In *GameDays*, volume LNCS of *Games for Training, Education, Health and Sports*, pages 115–128, Darmstadt, Germany. Springer.
- Hodas, S. (1996). Technology Refusal and the Organizational Culture of Schools. *Computerization and Controversy*, pages 197–218.
- Huguet, L., Lourdeaux, D., et Sabouret, N. (2017). VICTEAMS : une équipe de personnages virtuels autonomes pour la formation au sauvetage de blessés. In *Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents*, page 2.
- Iacovides, I., Cox, A., Kennedy, R., Cairns, P., et Jennett, C. (2015). Removing the HUD : The impact of non-diegetic game elements and expertise on player involvement. In *CHI PLAY 2015 - Proceedings of the 2015 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, pages 13–22.

-
- Jacoby, R. H. et Ellis, S. R. (1992). Using virtual menus in a virtual environment. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 1668, pages 39–48.
- Javaid, M. et Haleem, A. (2019). Virtual reality applications toward medical field. *Clinical Epidemiology and Global Health*, pages 0–1.
- Jennett, C., Cox, A. L., Cairns, P., Dhoparee, S., Epps, A., Tijs, T., et Walton, A. (2008). Measuring and defining the experience of immersion in games. *International Journal of Human Computer Studies*, 66(9) :641–661.
- Jensen, L. et Konradsen, F. (2018). A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training. *Education and Information Technologies*, 23(4) :1515–1529.
- Jin, S. A. (2010). The effects of incorporating a virtual agent in a computer-aided test designed for stress management education : The mediating role of enjoyment. *Computers in Human Behavior*, 26(3) :443–451.
- Johnson, W. L. et Rickel, J. (1997). Steve : an animated pedagogical agent for procedural training in virtual environments. *SIGART Bulletin*, 8(January 1997) :1–4.
- Kaddour, Z., Derrar, S. D., et Malti, A. (2020). VRAnat : A complete virtual reality platform for academic training in anatomy. In *Advances in Intelligent Systems and Computing*, volume 1103 AISC, pages 395–403.
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., et Lilienthal, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire : An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3) :203–220.
- Kevin, S., Pai, Y. S., et Kunze, K. (2018). Virtual gaze. *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology - VRST '18*, pages 1–2.
- Kim, Y., Baylor, A. L., et Shen, E. (2007). Pedagogical agents as learning companions : The impact of agent emotion and gender. *Journal of Computer Assisted Learning*, 23(3) :220–234.
- Kizil, M. (2003). Virtual reality applications in the Australian minerals industry. *Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industries*, pages 569–574.
- Lanquepin, V., Lourdeaux, D., Barot, C., Carpentier, K., Lhommet, M., et Amokrane, K. (2013). HUMANS : A HUMAN models based artificial environments software platform. In *ACM International Conference Proceeding Series*, page 1.

-
- LaViola, J. J. (2000). Msvt : a Virtual Reality-Based Multimodal Scientific Visualization Tool. In *Science And Technology*.
- Lester, J. C., Converse, S. a., Kahler, S. E., Barlow, S. T., Stone, B. a., et Bhogal, R. S. (1997). The Persona Effect : Affective Impact of Animated Pedagogical Agents. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '97*, pages 359–366.
- Lewis, J. R. (1995). IBM Computer Usability Satisfaction Questionnaires : Psychometric Evaluation and Instructions for Use. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 7(1) :57–78.
- Lhommet, M. (2012). *REPLICANTS : Humains virtuels cognitifs, émotionnels et sociaux. De l'empathie cognitive à l'empathie affective*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne.
- Limniou, M., Roberts, D., et Papadopoulos, N. (2008). Full immersive virtual environment CA-VETM in chemistry education. *Computers & Education*, 51(2) :584–593.
- Lin, F., Ye, L., Duffy, V. G., et Su, C. J. (2002). Developing virtual environments for industrial training. *Information Sciences*, 140(1-2) :153–170.
- Lin, Q., Xu, Z., Li, B., Baucom, R., Poulouse, B., Landman, B. A., et Bodenheimer, R. E. (2013). Immersive virtual reality for visualization of abdominal CT. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, page 867317.
- Liu, Y. (2015). Virtual neurosurgical education for image-guided deep brain stimulation neurosurgery. *ICALIP 2014 - 2014 International Conference on Audio, Language and Image Processing, Proceedings*, pages 623–626.
- Llanos, S. et Jørgensen, K. (2011). Do Players Prefer Integrated User Interfaces ? A Qualitative Study of Game UI Design Issues. *DiGRA 2011 Conference : Think Design Play*, pages 1–12.
- Lourdeaux, D., Benabbou, A., Huguet, L., et Lacaze-Labadie, R. (2017). HUMANS : suite logicielle pour la scénarisation d' environnements virtuels pour la formation à des situations socio-techniques complexes. *Conférence Nationale sur les Applications Pratiques de l'Intelligence Artificielle*.
- Makransky, G. et Petersen, G. B. (2019). Investigating the process of learning with desktop virtual reality : A structural equation modeling approach. *Computers & Education*, 134(Febbruary) :15–30.

-
- Marescaux, J., Clément, J.-M., Tasseti, V., Koehl, C., Cotin, S., Russier, Y., Mutter, D., Delingette, H., et Ayache, N. (1998). Virtual Reality Applied to Hepatic Surgery Simulation : The Next Revolution. *Annals of Surgery*, 228(5) :627–634.
- Marfisi-Schottman, I. (2012). *Méthodologie, modèles et outils pour la conception de Learning Games*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Marfisi-Schottman, I., Labat, J.-M., et Carron, T. (2013). Approche basée sur la méthode pédagogique des cas pour créer des Learning Games pertinents dans de nombreux domaines d'enseignement. In *Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain, EIAH'2013*, pages 67–78, Toulouse, France.
- Marfisi-Schottman, I., Sghaier, A., Georges, S., Patrick, P., et Tarpin-Bernard, F. (2009). Vers une industrialisation de la conception et de la production de Serious Games. In *Atelier "Jeux sérieux : conception et usages", EIAH'2009 Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain*, pages 75 – 84, Le Mans, France.
- Mariais, C. (2012). *Modèles pour la conception de Learning Role-Playing Games en formation professionnelle*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble.
- Marne, B. (2014). *Modèles et outils pour la conception de jeux sérieux : une approche meta-design*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- Marne, B. et Labat, J. M. (2014). Model and authoring tool to help teachers adapt serious games to their educational contexts. *International Journal of Learning Technology*, 9(2) :161.
- Martinez, C. (1997). L'entretien d'explicitation comme instrument de recueil de données. *Pratiques de l'entretien d'explicitation*, pages 1–9.
- Martirosov, S. et Kopecek, P. (2017). Cyber sickness in virtual reality - Literature review. *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, pages 718–726.
- Mathur, A. S. (2015). Low cost virtual reality for medical training. *2015 IEEE Virtual Reality Conference, VR 2015 - Proceedings*, pages 345–346.
- Mayor, J., Raya, L., et Sanchez, A. (2019). A comparative study of virtual reality methods of interaction and locomotion based on presence, cybersickness and usability. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, pages 1–12.
- Mellet D'huart, D. (2004). *De l'intention à l'attention. Contributions à une démarche de conception d'environnements virtuels pour apprendre à partir d'un modèle de l'(én)action*. Thèse de doctorat, Université du Maine.

-
- Michel, P., Richard, P., Yamaguchi, T., Verhulst, A., Verhulst, E., et Dinomais, M. (2016). Virtual reality system for rehabilitation of children with cerebral palsy : A preliminary study. *VISI-GRAPP 2016 - Proceedings of the 11th Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*, 1(Visigrapp) :306–313.
- Mine, M. (1995). Virtual environment interaction techniques. *UNC Chapel Hill Computer Science Technical Report . . .*, pages 1–18.
- Minoufekar, M., Schug, P., Zenker, P., et Plapper, P. (2019). Modelling of CNC Machine Tools for Augmented Reality Assistance Applications using Microsoft Hololens. In *Proceedings of the 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics - Volume 2 : ICINCO*, pages 627–636. SciTePress.
- Monteiro, P., Carvalho, D., Melo, M., Branco, F., et Bessa, M. (2018). Application of the steering law to virtual reality walking navigation interfaces. *Computers and Graphics (Pergamon)*, 77 :80–87.
- Monteiro, P., Coelho, H., Gonçalves, G., Melo, M., et Bessa, M. (2019). Comparison of radial and panel menus in virtual reality. *IEEE Access*, 7 :116370–116379.
- Motola, I., Devine, L. A., Chung, H. S., Sullivan, J. E., et Issenberg, S. B. (2013). Simulation in healthcare education : A best evidence practical guide. *Medical Teacher*, 35(10) :142–159.
- Muller, N. (2019). *Métaphores d'interaction pour la formation dans des environnements virtuels immersifs : application à Meca 3D*. Thèse de doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier.
- Navarre, D., Palanque, P., Bastide, R., Schyn, A., Winckler, M., Nedel, L. P., et Freitas, C. M. (2005). A formal description of multimodal interaction techniques for immersive virtual reality applications. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 3585 LNCS :170–183.
- Nemec, M., Fasuga, R., Trubac, J., et Kratochvil, J. (2017). Using virtual reality in education. *2017 15th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)*, pages 1–6.
- Nickel, C., Knight, C., Langille, A., et Godwin, A. (2019). How Much Practice Is Required to Reduce Performance Variability in a Virtual Reality Mining Simulator ? *Safety*, 5(2) :18.
- Nukarinen, T., Kangas, J., Rantala, J., Koskinen, O., et Raisamo, R. (2018). Evaluating ray casting and two gaze-based pointing techniques for object selection in virtual reality. *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology - VRST '18*, pages 1–2.

-
- Oikawa, S., Berg, B., Turban, J., Vincent, D., Mandai, Y., et Birkmire-Peters, D. (2016). Self-Debriefing vs Instructor Debriefing in a Pre-Internship Simulation Curriculum : Night on Call. *Hawai'i journal of medicine & public health : a journal of Asia Pacific Medicine & Public Health*, 75(5) :127–132.
- Olmos, E., Cavalcanti, J. F., Soler, J.-L., Contero, M., et Alcañiz, M. (2018). Mobile Virtual Reality : A Promising Technology to Change the Way We Learn and Teach. In *Mobile and ubiquitous learning*, chapter 6, pages 95–106. Springer.
- Otmane, S. (2000). *Télétravail robotisé et réalite augmentée : Application à la téléopération via internet*. Thèse de doctorat, Université d'EvryVal d'Essonne.
- Oubahssi, L., Mahdi, O., Piau-Toffolon, C., et Iksal, S. (2018). A process of design and production of Virtual Reality Learning Environments. In *International Conference on Collaborative Learning (ICL 2018)*, volume 916 of *Advances in Intelligent Systems and Computing*, pages 353–364, Kos Island, Greece.
- Oubahssi, L. et Piau-Toffolon, C. (2017). Conception et développement d'un environnement virtuel pour l'apprentissage : Application dans le cadre du projet ARVAD. In *ORPHEE Rendez-vous*, ORPHEE Rendez-vous 2017, Font-Romeu, France.
- Page, T. (2014). Skeuomorphism or at design : future directions in mobile device user interface (UI) design education.
- Palkova, Z. et Hatzilygeroudis, I. (2019). Virtual Reality and Its Applications in Vocational Education and Training. *Handbook of Mobile Teaching and Learning*, pages 1245–1274.
- Paquette, G. (2002a). Modélisation des connaissances et des compétences. In *Modélisation des connaissances et des compétences*, chapter 5, page 357. Les Presses de l'Université du Québec.
- Paquette, G. (2002b). Modélisation des connaissances et des compétences. In *Modélisation des connaissances et des compétences*, chapter 2, page 357. Les Presses de l'Université du Québec.
- Pastré, P. (2002). L'analyse du travail en didactique professionnelle. *Revue française de pédagogie*, No. 138, *Recherches sur les pratiques d'enseignement et de formation*, pages 9–17.
- Pastré, P., Mayen, P., et Vergnaud, G. (2006). La didactique professionnelle. *Revue Francaise de Pédagogie*, 154 :145–198.

-
- Peacocke, M., Teather, R. J., Carette, J., et MacKenzie, I. S. (2016). Evaluating the effectiveness of HUDs and diegetic ammo displays in first-person shooter games. *2015 IEEE Games Entertainment Media Conference, GEM 2015*.
- Pearson, E., Gkatzidou, V., et Green, S. (2009). A proposal for an adaptable personal learning environment to support learners needs and preferences. In *ASCILITE 2009 - The Australian Society for Computers in Learning in Tertiary Education*, pages 749–757.
- Pépin, Y. (1994). Savoirs pratiques et savoirs scolaires : une représentation constructiviste de l'éducation. *Revue des sciences de l'éducation*, 20(1) :63–85.
- Perrenoud, P. (1992). Différenciation de l'enseignement : résistances, deuils et paradoxes. *Cahiers pédagogiques*, 306 :49–55.
- Perrenoud, P. (1995a). Des savoirs aux compétences : de quoi parle-t-on en parlant de compétences. In *Pédagogie collégiale*, volume 9, pages 20–24.
- Perrenoud, P. (1995b). Enseigner des savoirs ou développer des compétences : l'école entre deux paradigmes. *Savoirs et savoir-faire*, pages 73–88.
- Perrenoud, P. (1999). Construire des compétences, est-ce tourner le dos aux savoirs ? *Résonances. Mensuel de l'école valaisanne. Dossier "Savoirs et compétences"*, 12(3) :3–7.
- Perrenoud, P. (2001). Évaluation formative et évaluation certificative : Postures contradictoires ou complémentaires ? *Formation professionnelle suisse*, 4 :25–28.
- Philip, C. (2005). Et si évaluer, c' était observer pour aider ? Évaluation et observation en situation d' apprentissage. *La nouvelle revue de l' AIS, Adaptation et intégration scolaires*, pages 19–34.
- Pinelle, D., Wong, N., et Stach, T. (2008). Heuristic evaluation for games : Usability principles for video game design. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, pages 1453–1462.
- Pochet, B. (1995). Le" problem-based learning", une révolution ou un progrès attendu. *Revue française de pédagogie*, 111(2) :95–107.
- Prensky, M. (2001). Digital Natives, Digital Immigrants. *On the Horizon*, 9(5).
- Qiu, T. M., Zhang, Y., Wu, J. S., Tang, W. J., Zhao, Y., Pan, Z. G., Mao, Y., et Zhou, L. F. (2010). Virtual reality presurgical planning for cerebral gliomas adjacent to motor pathways

-
- in an integrated 3-D stereoscopic visualization of structural MRI and DTI tractography. *Acta Neurochirurgica*, 152(11) :1847–1857.
- Radigois, P. (2018). Réalité virtuelle immersive et formation professionnelle. *Technologie number 214*, pages 40–44.
- Raffaele, R. C., de Carvalho, B. J. A., et Silva, F. G. M. (2017). Evaluation of immersive user interfaces in virtual reality first person games. *Proceedings of EPCGI 2017*, pages 123—126.
- Rebel, J.-L. et Gomez de Segura, B. (2010). L'approche par compétences en lycée professionnel Et la contribution des TICE. Technical report, Ministère de l'Éducation Nationale.
- Richard, E., Tijou, A., et Richard, P. (2006). Multi-modal virtual environments for education : From illusion to immersion. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 3942 LNCS :1274–1279.
- Richard, P. (2011). *CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'INTERACTION 3D MULTIMODALE ET DE LA PERFORMANCE HUMAINE EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL*. Thèse de doctorat, Université d'Angers.
- Roh, Y. S., Kelly, M., et Ho Ha, E. (2016). Comparison of instructor-led versus peer-led debriefing in nursing students. *Nursing and Health Sciences*, 18(2) :238–245.
- Rose, T., Nam, C. S., et Chen, K. B. (2018). Effect of levels of immersion on performance and presence in virtual occupational tasks. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, volume 3, pages 2079–2083.
- Rosenberg, L. B. (1992). The use of virtual fixtures as perceptual overlays to enhance operator performance in remote environments. Technical report, Stanford Univ Ca Center for Design Research.
- Rosenberg, L. B. (1993). Virtual fixtures : perceptual tools for telerobotic manipulation. In *1993 IEEE Annual Virtual Reality International Symposium*, pages 76–82.
- Rumetshofer, H. et Wöß, W. (2003). XML-based adaptation framework for psychological-driven E-learning systems. *Educational Technology and Society*, 6(4) :18–29.
- Ryu, J. et Baylor, A. L. (2005). The Psychometric Structure of Pedagogical Agent Persona. *Technology Instruction Cognition and Learning*, 2(4) :291–314.

-
- Rzayev, R., Mayer, S., Krauter, C., et Henze, N. (2019). Notification in VR : The effect of notification placement, task, and environment. In *CHI PLAY 2019 - Proceedings of the Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, pages 199–211.
- Salomoni, P., Prandi, C., Roccetti, M., Casanova, L., Marchetti, L., et Marfia, G. (2017). Diegetic user interfaces for virtual environments with HMDs : a user experience study with oculus rift. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 11(2) :173–184.
- Salzman, T., Stachniak, S., et Stürzlinger, W. (2001). Unconstrained vs. Constrained 3D scene manipulation. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2254 :207–219.
- Santos, A., Aedo, I., Zarronandia, T., Díaz, P., et Aedo, I. (2017). A Comparative Study of Menus in Virtual Reality Environments. *Proceedings of the Interactive Surfaces and Spaces on ZZZ - ISS '17*, pages 294–299.
- Schwind, V., Knierim, P., Hass, N., et Henze, N. (2019). Using Presence Questionnaires in Virtual Reality. In *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems Proceedings (CHI 2019)*.
- Sementille, A. C. (2004). Virtual Reality for medical training : a prototype to simulate breast aspiration exam. *Breast*, 1(212) :328–331.
- Sklar, E. et Richards, D. (2010). Agent-based systems for human learners. *Knowledge Engineering Review*, 25(2) :111–135.
- Slater, M., Linakis, V., Usoh, M., et Kooper, R. (1995a). Immersion , Presence , and Performance in Virtual Environments : An Experiment with Tri-Dimensional Chess. *Virtual Reality*.
- Slater, M. et Usoh, M. (1993). Presence in immersive virtual environments. *1993 IEEE Annual Virtual Reality International Symposium*, pages 90–96.
- Slater, M., Usoh, M., et Steed, A. (1995b). Taking Steps : The Influence of a Walking Technique on Presence in Virtual Reality. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 2(3) :201–219.
- Smith, G. et Stuerzlinger, W. (2001). Integration of Constraints into a VR Environment. In *Virtual Reality International Conference*, pages 103–110.
- Stojšić, I., Ivkov-Džigurski, A., et Maričić, O. (2018). Virtual reality as a learning tool : How and where to start with immersive teaching. *Didactics of Smart Pedagogy : Smart Pedagogy for Technology Enhanced Learning*, pages 353–369.

-
- Stromquist, N. P. (2019). *World Development Report 2019 : The changing nature of work*, volume 65. Springer.
- Sutherland, I. E. (1968). A head-mounted three dimensional display. In *Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I*, pages 757–764.
- Sweller, J. (1988). Cognitive Load During Problem Solving : Effects on Learning. *Cognitive science*, 285 :257–285.
- Taoum, J., Querrec, R., Saunier, J., et Blandin, B. (2015). EAST : Environnements d'Apprentissage Scientifiques et Techniques. In *Les journées de l'AFRV 2015.*, Bordeaux, France.
- Taupiac, J.-d. (2018). Training soldiers to calibration procedures in Virtual Reality , the FELIN IR sight use case Training soldiers to calibration procedures in Virtual Reality , the FELIN IR sight use case. In *Conference : 13emes Journées de la Réalité Virtuelle*, page 10.
- Temperman, G., De Lièvre, B., et Boumazguida, K. (2017). Effets de relances par QR codes sur l' apprentissage dans un manuel scolaire augmenté. In *EIAH'2017*.
- Torrente, J., Moreno-Ger, P., Martínez-Ortiz, I., et Fernandez-Manjon, B. (2009). Integration and deployment of educational games in e-learning environments : The learning object model meets educational gaming. *Journal of Educational Technology & Society*, 12(4) :359–371.
- Van Wyk, E. et De Villiers, R. (2009). Virtual reality training applications for the mining industry. In *Proceedings of AFRIGRAPH 2009 : 6th International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa*, volume 1, pages 53–64.
- Veit, M., Capobianco, A., et Bechmann, D. (2009). Influence of degrees of freedom's manipulation on performances during orientation tasks in virtual reality environments. *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST*, 1(212) :51–58.
- Verhulst, A., Yamaguchi, T., et Richard, P. (2015). Physiological-based dynamic difficulty adaptation in a theragame for children with cerebral palsy. *PhyCS 2015 - 2nd International Conference on Physiological Computing Systems, Proceedings*, pages 164–171.
- Verhulst, E. (2019). *Contribution de l'étude de l'interaction en environnement virtuel : intérêt de la charge mentale*. Thèse de doctorat, Université d'Angers.
- Verkuyl, M., Atack, L., McCulloch, T., Liu, L., Betts, L., Lapum, J. L., Hughes, M., Mastrilli, P., et Romaniuk, D. (2018). Comparison of Debriefing Methods after a Virtual Simulation : An Experiment. *Clinical Simulation in Nursing*, 19 :1–7.

-
- Vermeulen, M. (2018). *Une approche meta-design des learning games pour développer leur usage*. Thèse de doctorat, Sorbonne Université.
- Vermeulen, M., Guigon, G., Mandran, N., et Labat, J.-M. (2017). L'enseignant au cœur de la conception de learning games : le modèle DISC. In *EIAH 2017 - 8ème Conférence Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain*, Strasbourg, France.
- Wasfy, T. M., Wasfy, A. M., El-Mounay, H., et Aw, D. (2005). Virtual Training Environment for a 3-Axis Cnc Milling Machine. *ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, page 10.
- Wu, H., Luo, W., Pan, N., Nan, S., Deng, Y., et Fu, S. (2019). Understanding freehand gestures : a study of freehand gestural interaction for immersive VR shopping applications. *Human-centric Computing and Information Sciences*.
- Yair, Y., Mintz, R., et Litvak, S. (2001). 3D-Virtual Reality in Science Education : An Implication for Astronomy Teaching. *Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching*, 20(3) :293–305.
- Yanchapanta, F. E., Santo, B. S., et Terán, H. C. (2019). Training with Virtual Learning Environments for Industrial Refrigeration Systems. *Journal of Physics : Conference Series*, 1335 :012012.
- Zaharudin, R. et Ting, V. Y. (2019). Students' learning experiences towards the use of assessments in a virtual learning environment (vle). In *4th ASEAN Conference on Psychology, Counselling, and Humanities (ACPCH 2018)*. Atlantis Press.
- Zakhartchouk, J.-m. (1996). Consignes : aider les élèves à décoder. *Pratiques*, 90(1) :9–25.
- Zhang, S., Demiralp, Ç., Keefe, D. F., DaSilva, M., Laidlaw, D. H., Greenberg, B. D., Basser, P. J., Pierpaoli, C., Chiocca, E. A., et Deisboeck, T. S. (2001). An immersive virtual environment for DT-MRI volume visualization applications : A case study. *Proceedings of the IEEE Visualization Conference*, Vi :437–440.
- Zipp, S. A. et Craig, S. D. (2019). The impact of a user's biases on interactions with virtual humans and learning during virtual emergency management training. *Educational Technology Research and Development*, 67(6) :1385–1404.
- Żukowska, M., Buń, P., Górski, F., et Starzyńska, B. (2019). Cyber sickness in industrial virtual reality training. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 1 :137–149.

Annexes

EXEMPLES DE FORMALISME D'AIDE À LA CRÉATION D'ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUES

Tâches du Scénario	Activités Tâches Résultat Attendu	Compétences Savoirs agir	Critères d'évaluation Indicateurs de performance	Référents dans la situation	Référé (Moyen de mesure)
Le pilote arrive sur le poste de conduite et reprend la production après son collègue de l'équipe précédente, l'aléa intervient après un temps de 30 secondes de conduite.					
<p>Réagir en fonction de l'alerte visuelle. (Fumées) Savoir réagir dans un temps approprié. Comme il n'est pas possible de simuler l'odeur, faire apparaître de la fumée blanche de plus en plus épaisse au-dessus du four.</p> <p>Pour le niveau 1 : faire apparaître en surbrillance la fumée et les fardeaux endommagés, et laisser le temps au pilote de réagir.</p> <p>Pour le niveau 2 : faire apparaître en surbrillance la fumée et les fardeaux endommagés, pour aider le pilote dans son action, le plus rapidement possible.</p> <p>Pour le niveau 3 : Donner l'information au pilote qu'il doit extraire de la ligne les fardeaux endommagés, il doit réagir au plus vite.</p> <p>Pour le niveau 4 : Le pilote doit en autonomie, réagir sans aide.</p>	<p>A3T4 Réagir aux situations non prévues (dysfonctionnements, aléas, etc.)</p> <p><i>Le produit fabriqué ou conditionné n'a pas subi de détérioration ou a été rebuté.</i></p>	<p>CP04 Piloter une ligne ou un système de production</p> <p><i>Réagir en fonction de l'alerte visuelle ou sonore ou du défaut constaté</i></p>	<p>Le produit fabriqué ou conditionné n'a pas subi de détérioration ou a été rebuté</p>	<p>Le pilote doit tout de suite se diriger vers la machine pour appuyer sur l'arrêt d'urgence. (Mouvement du pilote) doit être inférieur à 15 secondes et le plus court possible.</p> <p>Le pilote positionne les packs endommagés dans le bac de rebus en fin de tâche.</p>	<p>Numérique : Le temps de réaction entre l'apparition de la fumée et l'activité autour de la machine doit être le plus rapide possible.</p> <p>Incrémentation du nombre de produits rebutés.</p> <p>Entretien : Le retour sur l'activité indiquera la réalité de ce contrôle.</p>
<p>Ce que ne doit pas faire le pilote : Le pilote ne doit pas lancer de l'eau pour arrêter le départ de feu avec le kit de nettoyage à proximité du poste ! Déclencher ou faire déclencher l'extincteur de l'atelier ! Retirer le fardeau brûlé avec les mains dans le four ! Intervenir sur la machine.</p> <p>Si le pilote ne réagit pas : Faire démarrer un décompte pour intervenir plus rapidement image de fond en rouge (mettre un peu de pression, sur le même principe que sur les jeux vidéo lorsque le personnage arrive en fin de vie) Si le pilote ne réagit pas au bout de 30 secondes et ne voit pas le problème malgré le décompte alors faire démarrer le feu dans la machine et faire retentir la sirène d'évacuation des bâtiments de l'entreprise et le scénario s'arrête.</p>					

FIGURE A.1 – Modèle de formalisme pour la conception d'activités virtuelles utilisées dans les filières ST12D.

Tâches du Scénario	Activités Tâches Résultat Attendu	Compétences Savoir agir	Critères d'évaluation Indicateurs de performance	Référents dans la situation	Référé Moyen de mesure
<p>Le vendeur doit se rendre dans le magasin et installer les produits en promotion en Tête de gondole à partir d'un piano gramme présentant les produits à installer, la zone et les consignes d'installation, le prospectus concerné</p> <p style="text-align: center;">Aléa : une référence n'est pas en stock</p>					
<p>Respecter les étapes de la mise en place</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- Vérifier l'adéquation de la tête de gondole avec les produits à installer (les changer si nécessaire) 2- Vider la tête de gondole 3- Nettoyer les étagères 4- Disposer les produits en tête de gondole 5- Compléter les états de suivi d'opérations <p>Pour le niveau 1 : 2 référents validés Pour le niveau 2 : 5 référents validés Pour le niveau 3 : 7 référents validés Pour le niveau 4 : 10 référents validés</p>	<p>C33 participer à l'installation des produits promotionnels, saisonniers, événementiels</p> <ul style="list-style-type: none"> • Respect des règles d'implantation, de présentation et d'affichage • Maintien de l'état qualitatif du rayon et de son environnement • Maintien de l'attractivité du rayon • Respect des règles de conservation, d'hygiène et de sécurité • Respect des aires de circulation de la clientèle • Fiabilité de la mise en rayon 	<p>C2 Maintenir l'état marchand du rayon</p> <ul style="list-style-type: none"> • Choix du bon support de présentation pour les produits • Respect des règles de sécurité • Respect des règles d'implantation et de présentation • Respect des consignes d'utilisation du matériel de manutention 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Le vendeur doit observer le rayon de départ, décider s'il change ou non les supports. (fin d'activité, les palettes, ajout de produits) 2. Aller chercher les produits et le matériel en réserve 3. Vider la tête de gondole et rangement des produits en réserve dans des colis 4. Nettoyer la tête de gondole 5. Vérifier les références avec le prospectus 6. Faire le squelette de la mise en rayon 7. Trouver une solution pour remplacer une référence manquante (laisser demande écrite) 8. Remplir la tête de gondole et afficher les étiquettes prix 9. Installer les panneaux promotionnels 10. Prendre une photo finale 	<p>Le retour sur l'activité indiquera la réalité de ce contrôle et les choix</p> <p>Traces simulateur (utilisation du matériel)</p> <p>Traces simulateur</p> <p>Deux niveaux : Novice : mettre dans un carton Expert : rangement en réserve</p> <p>Traces simulateur</p> <p>Indication sur la tablette virtuelle</p> <p>Novice : la palette est prête Expérimenté : doit chercher les produits, les mettre sur palette Prendre en photo le squelette</p> <p>L'élève a plusieurs possibilités (double clic d'une référence... Le retour sur l'activité donnera des informations sur la valeur</p> <p>Rapport : liste des produits reliés à un prix La photo finale permet de visualiser et analyser le résultat</p> <p>Garder la trace du temps passé à réaliser toutes les étapes</p>	
<p>Ce que ne doit pas faire le vendeur :</p> <p>Si le vendeur ne sait pas faire :</p> <p>Au bout de 2 minutes, lui donner des indications sous forme d'aide.</p> <p>Si le vendeur passe trop de temps à vérifier les colis (plus de 1 minute) le livreur s'impatiente</p> <p>Si le vendeur passe trop de temps à compiler les produits (plus de 2 minutes), le livreur s'impatiente et un autre livreur pressé apparaît avec des colis.</p> <p>Rubrique Aide sur la tablette :</p> <p>L'élève clique sur « aide » et doit prendre la photo du problème systématiquement pour en débriefer ensuite</p>					
<p>Tracé par le simulateur automatiquement</p> <p>Retracé par le formateur après un entretien d'auto-confrontation</p>					

FIGURE A.2 – Application du modèle ST12D au référentiel du Bac Pro Commerce.

SCENARIO IDENTIFICATION PANNE SUR LIGNE

Tâches du scénario	Compétences PLP	Compétences CIMA	Critères d'évaluation Indicateurs de performance	Moyen de mesure
1) Avant de réaliser le changement de format	Choisir et combiner des modes opératoires pour faire face à son intervention	Compétences CIMA	Respecter les étapes de façon méthodique. Est-ce possible de mettre une question : Numérotée les étapes du changement de format dans l'ordre chronologique de votre intervention : Je lis l'OF Je vidange la ligne Je change les éléments de la machine Je fais mes différents réglages Je valide mes réglages Je fais un essai	Les étapes sont correctement numérotées dans la chronologie
2) Faire une vidange de la machine	Choisir et combiner des modes opératoires pour faire face à son intervention		Se mettre en mode arrêt avec vidange Mette aucune bouteille au début	Le candidat a bien appuyé sur le mode vidange
3) Arrêter la machine pour faire le changement de format	Intervenir en toute sécurité			La machine est arrêtée

FIGURE A.3 – Exemple de document décrivant les tâches pour une situation pédagogique de PLP. Ce document constitue la demande initiale du client, sur lequel le concepteur doit s'appuyer pour concevoir et implémenter l'activité pédagogique.

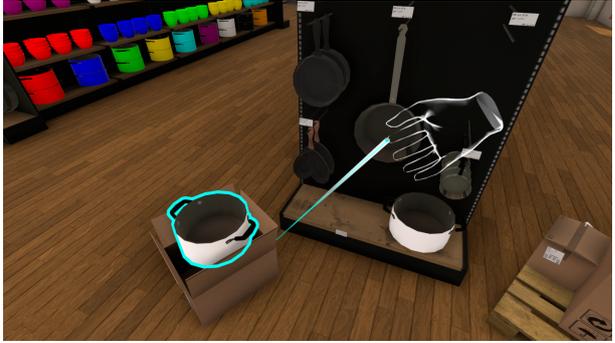
RÉALISATION DE L'EXPÉRIMENTATION

TABLEAU B.1 – Exemple de réalisation de l'expérimentation en suivant les étapes dites « idéales ». D'autres approches de réalisation valides sont également possible.

Étapes du scénario pédagogique	Exemple dans l'EV
<p>Le participant doit aller observer la gondole à aménager.</p>	
<p>Le participant doit aller chercher les produits dans la réserve.</p>	

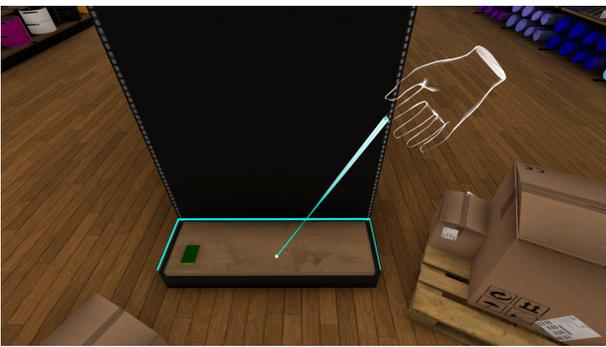
Suite sur la prochaine page

Tableau B.1 – *Continué depuis la page précédente*

Étapes du scénario pédagogique	Exemple dans l'EV
<p>Le participant doit déposer les produits à proximité de la gondole.</p>	
<p>Le participant doit prendre un carton vide depuis la tablette virtuelle.</p>	
<p>Le participant doit ranger les anciens produits dans le carton.</p>	

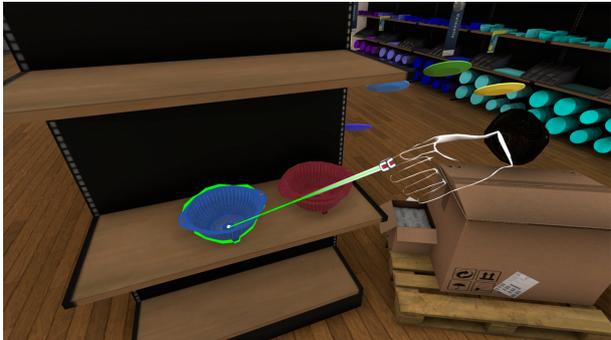
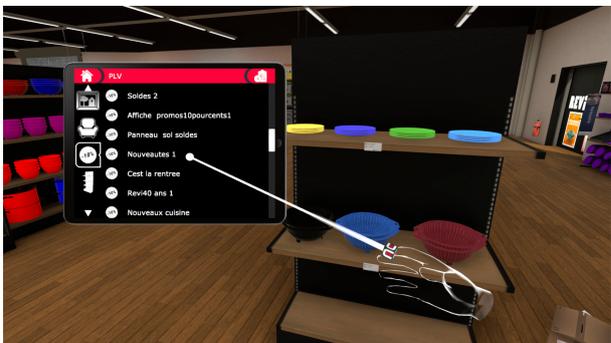
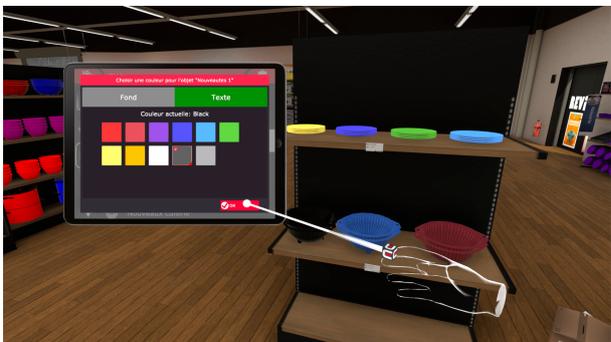
Suite sur la prochaine page

Tableau B.1 – *Continué depuis la page précédente*

Étapes du scénario pédagogique	Exemple dans l'EV
<p>Le participant doit supprimer les picots présents sur la gondole.</p>	
<p>Le participant doit nettoyer la gondole à l'aide de l'outil éponge pris depuis la tablette virtuelle.</p>	
<p>Le participant doit placer des nouvelles « tablettes » (plateaux) sur la gondole.</p>	

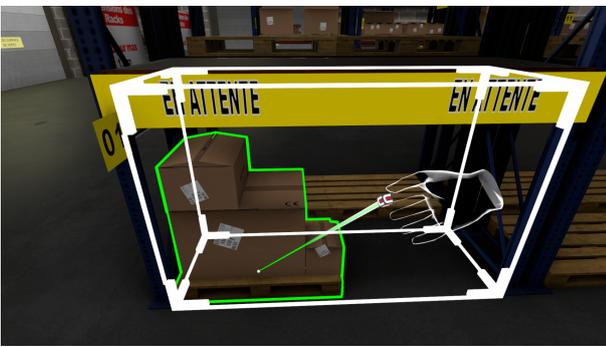
Suite sur la prochaine page

Tableau B.1 – *Continué depuis la page précédente*

Étapes du scénario pédagogique	Exemple dans l'EV
<p>Le participant doit placer les nouveaux produits.</p>	
<p>Le participant doit prendre un élément de PLV depuis la tablette virtuelle.</p>	
<p>Le participant peut changer la couleur des éléments constituant le panneau.</p>	

Suite sur la prochaine page

Tableau B.1 – *Continué depuis la page précédente*

Étapes du scénario pédagogique	Exemple dans l'EV
<p>Le participant doit placer le panneau.</p>	
<p>Le participant doit ranger la palette contenant les anciens produits dans la réserve, dans le rack « EN ATTENTE ».</p>	
<p>Le participant doit terminer l'activité en retournant à son point de départ et en interagissant avec une UI.</p>	

EXTRAIT DU RÉFÉRENTIEL DU BAC PRO

COMMERCE

Contexte professionnel :

Le titulaire du baccalauréat professionnel « Métiers du commerce et de la vente » option « Animation et gestion de l'espace commercial » exerce son activité auprès de la clientèle actuelle et potentielle d'une unité commerciale physique ou à distance, dans un cadre omnicanal.

Il assure des missions qui relèvent de la gestion des achats, de l'organisation de la vente, de l'animation commerciale et du suivi des performances. Il utilise ses compétences pour développer l'activité courante et générer du trafic, dans le respect des recommandations de l'entreprise. Il utilise en permanence les technologies de l'information et de la communication.

Dans ce contexte, le titulaire du baccalauréat professionnel « Métiers du commerce et de la vente » option « Animation et gestion de l'espace commercial » dispose :

- des préconisations de l'entreprise quant à la politique d'achat et d'approvisionnement,
- d'un accès privilégié au système d'information commercial de l'entreprise (données clients, informations fournisseurs, cadenciers, tableaux de bord...),
- de logiciels de gestion des commandes, des stocks, de suivi des fournisseurs, d'étiquetage... – des caractéristiques techniques et commerciales des produits et/ou des services vendus,
- d'outils d'aide à la vente (argumentaires, outils de présentation visuelle, plaquettes commerciales, charte qualité de l'entreprise, site internet...),
- des conditions générales de vente (unité commerciale physique et à distance),
- de la législation spécifique aux produits vendus dans l'unité commerciale en matière d'hygiène et de sécurité.

Compétences détaillées	Comportements professionnels	Savoirs associés	Résultats attendus
<p>Assurer les opérations préalables à la vente</p> <p>Établir les commandes des produits auprès de la centrale d'achats et/ou des fournisseurs indépendants sélectionnés avec la hiérarchie, en tenant compte des contraintes</p> <p>Préparer les commandes des clients issues de l'omnicanal</p> <p>Veiller à la gestion rigoureuse des stocks et au réapprovisionnement en tenant compte des règles de sécurité et d'hygiène</p> <p>Réceptionner, contrôler et stocker les marchandises (quantitatif et qualitatif)</p> <p>Respecter les règles de valorisation des déchets et réduire le gaspillage</p> <p>Effectuer les relances et préparer les retours fournisseurs</p>	<p>Être dynamique</p> <p>Avoir le sens des responsabilités</p> <p>Être disponible</p> <p>Faire preuve d'un esprit d'équipe et d'adaptabilité</p> <p>Être organisé, méthodique et rigoureux</p> <p>Être vigilant</p> <p>Appliquer les règles d'économies d'efforts</p>	<p>Les caractéristiques des unités commerciales physiques et virtuelles</p> <p>La gestion des approvisionnements</p> <p>L'e-traitement des commandes dans le cadre de l'omnicanal</p> <p>La réglementation en matière d'hygiène et de sécurité</p> <p>La réception et la livraison des marchandises</p> <p>Le stockage des marchandises</p> <p>Le traitement des déchets</p>	<p>Le processus d'achat et d'approvisionnement est maîtrisé dans le respect des coûts et des délais impartis</p> <p>Les outils numériques utilisés sont pertinents et adaptés</p> <p>Les stocks sont optimisés</p> <p>La marchandise sensible est sécurisée</p> <p>Les dates limites de vente et de péremption des produits sont respectées</p> <p>L'état des stocks est correctement renseigné et analysé</p>

<p>Établir le prix en fonction de variables commerciales données</p> <p>Étiqueter les produits et les sécuriser</p> <p>Enrichir et exploiter le système d'information commercial</p> <p>Comparer les résultats aux objectifs fixés et proposer des actions correctrices</p> <p>Participer aux opérations d'inventaire</p> <p>Identifier les invendus</p> <p>Lutter contre la démarque</p> <p>Gérer les retours et les échanges des clients</p>		<p>Le cadencier <i>Le SIC</i></p> <p>L'étiquetage et la sécurisation des marchandises.</p> <p>Les informations et la réglementation sur les produits</p> <p>La fixation du prix de vente</p> <p>Les inventaires Les différentes démarques</p> <p>Les indicateurs de gestion et d'exploitation</p> <p>Les contraintes légales de la vente à distance</p>	<p>Les déchets sont valorisés et le gaspillage est réduit</p> <p>Les logiciels de gestion commerciale sont mis à jour</p> <p>L'étiquetage est conforme à la réglementation en vigueur</p> <p>Les axes d'amélioration proposés sont réalisables</p> <p>Les causes et les conséquences de la démarque sont clairement identifiées et les solutions proposées sont adaptées</p>
<p>Rendre l'unité commerciale attractive et fonctionnelle</p> <p>S'assurer de la disponibilité et de la qualité des produits</p> <p>Implanter les produits selon une logique commerciale et/ou d'entreprise</p> <p>Vérifier l'étiquetage, le balisage et la mise en valeur des produits</p> <p>S'assurer de la bonne tenue et de la propreté du rayon</p> <p>Accueillir, informer et orienter le client dans l'unité commerciale et à l'extérieur</p> <p>Mettre en place la signalétique</p> <p>Participer à l'agencement de la surface de vente</p> <p>Aménager la vitrine et/ou le rayon</p> <p>Mettre en scène l'offre et en optimiser la visibilité</p>	<p>Faire preuve d'autonomie et d'esprit d'initiative</p> <p>Être capable de s'adapter au contexte de travail</p> <p>Faire preuve de disponibilité</p> <p>Être créatif</p> <p>Être rigoureux et réactif</p> <p>Donner une image valorisante et attractive de l'entreprise</p>	<p>L'agencement de l'unité commerciale</p> <p>Les éléments de communication intérieure mettant en valeur l'offre</p> <p>Les facteurs d'ambiance</p> <p>Le merchandising de gestion et les logiciels spécifiques</p>	<p>Les enjeux de la mise en valeur des produits et des services associés sont précisés</p> <p>L'agencement de l'unité commerciale est pertinent et différencié selon les types d'unités commerciales</p> <p>L'attractivité des produits, des rayons et de l'unité commerciale est analysée et des actions de remédiation sont mises en place le cas échéant</p> <p>Les logiciels spécifiques sont maîtrisés</p> <p>La politique de</p>

<p>Veiller au respect des règles d'hygiène et de sécurité.</p> <p>Valoriser l'offre sur les sites marchands et les réseaux sociaux</p>		<p>L'offre sur les sites marchands et les réseaux sociaux</p>	<p>communication est en adéquation avec l'offre produit et la clientèle</p> <p>L'information est conforme à la politique de l'enseigne, visible et attractive</p> <p>Les règles d'hygiène et sécurité sont scrupuleusement respectées</p>
<p>Développer la clientèle</p> <p>Proposer des actions commerciales génératrices de trafic dans l'unité commerciale</p> <p>Sélectionner les gammes de produits à mettre en avant en lien avec la stratégie de l'unité commerciale</p> <p>Participer à la planification et à l'organisation des actions de promotion des marchandises</p> <p>Démarcher une nouvelle clientèle</p> <p>Communiquer sur l'événement</p> <p>Recourir aux sites marchands et aux réseaux sociaux</p> <p>Inciter à l'achat par une action commerciale, le cas échéant interactive</p> <p>Générer des contacts positifs/utiles</p> <p>Participer à l'évaluation et à l'analyse des performances des actions commerciales</p>	<p>Faire preuve d'initiative</p> <p>Être force de proposition</p> <p>Être créatif</p> <p>Faire preuve d'organisation et d'anticipation</p> <p>Être à l'écoute et faire preuve d'empathie</p>	<p>Les études en matière de comportement du consommateur, de satisfaction-client et de concurrence</p> <p>Les bases de données commerciales, les fichiers clients</p> <p>La segmentation de la clientèle</p> <p>Les méthodes et outils de prospection</p> <p>Les logiciels spécifiques</p> <p>La communication commerciale (numérique, omnicanale), ses outils et ses supports</p> <p><i>Les réseaux sociaux</i> <i>La promotion des ventes</i></p> <p>Les plans d'actions commerciales et les budgets publipromotionnels</p> <p>L'information sur le marché</p> <p>Les tableaux de bord</p>	<p>Les propositions d'actions commerciales sont argumentées et cohérentes avec les objectifs à atteindre</p> <p>Les recommandations de l'enseigne sont respectées</p> <p>Les supports utilisés respectent les contraintes et la réglementation et sont attractifs pour les clients actuels et potentiels</p> <p>Les performances commerciales et financières des actions de conquête de nouveaux clients sont contrôlées et évaluées en analysant des tableaux de bord</p> <p>Les solutions/axes d'amélioration sont justifiées.</p>
<p>Critères d'évaluation :</p> <p><input type="checkbox"/> Respect des délais de passation des commandes au meilleur rapport coût/prestation</p>			

-
- Réduction des ruptures, des surstocks et de la démarque □ Propositions argumentées de nouveaux fournisseurs
 - Pertinence de l'utilisation des outils d'aide à la décision
 - Respect des recommandations du siège en matière d'aménagement de l'espace de vente
 - Adaptation de l'aménagement en fonction des attentes des clients et/ ou du contexte
 - Mise en place de facteurs d'ambiance appropriés
 - Information sur le lieu de vente ou sur le site marchand conforme aux recommandations, visible, compréhensible et utile pour le client
 - Respect des règles d'hygiène, de sécurité et d'économies d'efforts
 - Contribution aux actions commerciales engagées par l'entreprise afin de générer du trafic client
 - Cohérence des initiatives locales avec les objectifs, les produits, les cibles, les attentes du client et dans le respect des contraintes légales
 - Cohérence des choix des moyens d'information et de communication, avec les objectifs commerciaux et financiers
 - Qualité des comptes rendus effectués
 - Pertinence de l'analyse des résultats/performances

FIGURE C.1 – Extrait du bloc 4A du référentiel du Bac Pro Commerce (2019) sur lequel sont basées les activités pédagogiques virtuelles conçues.

QUESTIONNAIRE POUR L'APPRENANT

Quel est ton numéro de participant ? *

Votre réponse

Quel est ton sexe *

- Homme
- Femme
- Je ne souhaite pas le préciser

Quelle est ta date de naissance ? *

Date

jj/mm/aaaa

Quelle est ta classe ? *

- CAP
- Seconde BAC Pro
- Première BAC Pro
- Terminale BAC Pro
- BTS

As-tu déjà utilisé la réalité virtuelle ? *

- Oui
- Non

Si oui, pour quoi faire ?

Votre réponse _____

Tu as utilisé le casque avec fil ? *

Oui

Non

A ton avis, combien de temps as-tu passé dans la réalité virtuelle ? *

Il s'agit d'une estimation, tu peux mettre une fourchette du genre "entre 5 et 7 minutes"

Votre réponse _____

Quelle est ta filière ? *

Commerce

Vente

Accueil

Autre : _____

Interactions

Cette partie concerne l'utilisation de l'outil et des interactions dans l'environnement virtuel

J'ai mis très peu de temps à maîtriser l'outil virtuel *

C'est à dire comprendre les différents boutons

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

J'ai trouvé la méthode de déplacement simple à maîtriser/comprendre *

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

J'ai trouvé la méthode de déplacement efficace *

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

J'ai eu des sensations de mal-être pendant l'activité *

Tête qui tourne, mal à la tête, vision troublée, nausées, etc...

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

J'ai confondu les boutons de la manette *

0 1 2 3 4 5 6

Pas du tout Fortement

J'ai principalement confondu les boutons suivants

- Téléportation
- Interaction
- Relâchement d'objet

Selon moi, interagir avec les objets a été simple *

Comme par exemple prendre un produit, utiliser les cartons, déplacer la palette

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

J'ai trouvé la tablette virtuelle utile *

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Je trouve la tablette virtuelle facile à utiliser *

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

J'ai bien réussi à lire les textes sur la tablette virtuelle *

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Je pense avoir besoin de l'aide d'un enseignant pour utiliser la réalité virtuelle *

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Activité

Je suis satisfait de ma performance *

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

J'ai trouvé l'activité ludique (sympa, cool, intéressante) *

0 1 2 3 4 5
Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

J'ai bien compris la consigne *

0 1 2 3 4 5
Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Je pense avoir bien réussi l'activité *

0 1 2 3 4 5
Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

J'ai trouvé l'environnement virtuel très proche de la réalité *

0 1 2 3 4 5
Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

J'ai déjà fait un stage dans un magasin *

Oui

Non

J'ai déjà effectué cette activité en réel *

Oui

Non

Si oui, dans quelles conditions ?

Stage

École

Job d'été

Autre : _____

Liens avec la formation

J'ai trouvé cette activité intéressante pour ma formation *

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Je pense que ce genre d'outil peut m'aider à progresser *

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

J'ai trouvé l'activité proche de la réalité *

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Je pense que la réalité virtuelle peut être utile dans les cas suivants

- Préparation de stage
- Préparation d'examen
- Préparation de travaux pratiques (s'entraîner en virtuel avant de faire l'activité dans le magasin pédagogique)
- Pour analyser les réalisations de mes camarades , professionnels ou enseignants
- Faire du travail en groupe avec mes camarades de classe
- Pour me perfectionner dans une tâche précise
- Pour faire face à diverses situations professionnelles
- Pour trouver et analyser des erreurs
- Autre : _____

J'aimerais recommencer cette activité ou une autre, dans le magasin virtuel *

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Je pense que je peux montrer plus précisément à l'enseignant ce que je suis capable de faire grâce à la réalité virtuelle *

Ex: Grâce à la réalité virtuelle, l'enseignant peut mieux savoir mes points faibles et mes points forts. Je peux montrer ce que j'ai appris en stage

0 1 2 3 4 5
Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

La réalité virtuelle peut me permettre d'avoir une approche professionnelle plus riche/complète *

0 1 2 3 4 5
Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

La réalité virtuelle peut m'aider à prendre confiance en situation professionnelle. *

0 1 2 3 4 5
Tout à fait d'accord Pas du tout d'accord

Autre chose à ajouter ?

Des remarques, questions, points d'étonnements. Cette partie est libre

Votre réponse

QUESTIONNAIRE POUR LES ENSEIGNANTS

Quel est votre numéro de participant ? *

Votre réponse _____

Quel est votre sexe *

- Femme
- Homme
- Je ne souhaite pas le préciser

Dans quelles filières enseignez-vous ? *

- CAP
- Commerce
- Vente
- BTS
- Formation Continue
- Autre : _____

Avez-vous déjà utilisé la réalité virtuelle ? *

Il peut s'agir d'un autre casque ou application

- Oui
- Non

Si oui, avez-vous déjà utilisé/connaissez-vous cette application ?

- Oui
- Non

Effectuez-vous cette activité (ex: mise en rayon) en réel/en classe avec les élèves ? *

Est-ce que vous faites cette activité virtuelle/ou équivalent avec les élèves en classe entière ? Par exemple si l'élève a effectué une mise en rayon virtuelle, est-ce que vous faites des mises en rayon en réel dans un magasin pédagogique (ou autre) ?

- Oui
- Non

Si oui, cette activité est-elle facile à mettre en oeuvre ?

D'un point de vue global (logistique, mise en application, mobilisation des élèves, etc..)

- Oui
- Non

Si oui, cette activité est-elle facilement évaluable ?

- Oui
- Non

Cette activité est souvent rencontrée dans le monde professionnel *

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Évaluation en temps réel

C'est à dire l'évaluation de l'élève pendant qu'il réalise l'activité virtuelle

Avez-vous participé à l'évaluation "temps réel" ? *

Il s'agit de la méthode d'évaluation qui se réalise pendant que l'élève est en train de faire l'activité virtuelle. C'est l'activité où vous avez utilisé la vue collaborative

- Oui
- Non

Évaluation en temps réel

Combien d'élèves avez-vous évalués ? *

Votre réponse _____

Vous avez pu observer les élèves correctement *

Les conditions/outils à votre disposition ont-ils permis une bonne observation des élèves pendant qu'ils effectuaient l'activité.

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Les outils virtuels existants sont suffisant pour permettre l'évaluation des élèves *

Les outils en question sont : le changement de vue, le retour collaboratif, les outils qui permettent de guider/informer/interagir ou encore déplacer l'utilisateur.

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Ces outils sont faciles à maîtriser/utiliser *

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Avez-vous échangé à l'oral avec les élèves lors de la réalisation de la tâche ? *

Oui

Non

Si oui, pour quelles raisons ?

L'élève ne savait pas quelle tâche il devait effectuer

L'élève était perdu dans l'environnement virtuel

L'élève a oublié de faire une tâche importante

L'élève vous a sollicité

Pour donner des conseils à l'élève

Pour demander à l'élève de commenter ce qu'il vient de faire

Autre : _____

Si oui, pouvez-vous estimer le pourcentage d'élèves avec lesquels vous avez échangé à l'oral ?

Votre réponse _____

Avez-vous eu des difficultés à voir certaines étapes de la réalisation des élèves ?

*

C'est à dire que l'élève à réalisé une action et que vous avez eu du mal à l'observer ou comprendre

- Oui
- Non

Si oui, pour quelles raisons ?

- La caméra collaborative était mal placée
- L'élève a été trop vite
- Vous ne regardiez pas l'écran collaboratif
- Autre : _____

Le système de grille d'évaluation est adéquat *

- 0 1 2 3 4 5
- Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Ce genre d'évaluation vous semble correct et adapté *

(évaluation temps réel)

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord

Tout à fait d'accord

Ce genre d'évaluation vous permet d'évaluer de manière efficace la réalisation de l'élève *

(évaluation temps réel)

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord

Tout à fait d'accord

Avez-vous évalué des élèves de différentes classes ? *

Oui

Non

Si oui, ces différences étaient visibles lors des évaluations

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Cette méthode d'évaluation peut être mise en place facilement en conditions réelles (classe) *

Vous voyez-vous utiliser cette méthode (temps réel) dans le cadre de vos enseignements

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Cette méthode peut être utilisée pour faire du travail en groupe *

(temps réel)

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Evaluation avec débriefing

Il s'agit de l'évaluation qui s'est effectuée après la réalisation virtuelle à l'aide des données issues de la session virtuelle (rapport d'activité, vidéo, images, etc..)

Avez-vous participé à l'évaluation "débriefing" ? *

Oui

Non

Evaluation avec débriefing

Il s'agit de l'évaluation qui s'est effectuée après la réalisation virtuelle à l'aide des données issues de la session virtuelle (rapport d'activité, vidéo, images, etc..)

Combien d'élèves avez-vous évalués ? *

Votre réponse

Quel était la durée moyenne du débriefing ? *

h min s

__ : __ : __

Pensez-vous que le temps de débriefing est dépendant du niveau des élèves *

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Les outils/données à votre disposition sont suffisant pour mener à bien le débriefing *

Exemple d'outils: Rapport d'activité, Vidéos, Images, etc...

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Le temps de parole de l'élève avant les questions est pertinent *

C'est à dire, est-ce qu'il faut que l'élève ait un peu de temps pour expliquer sa réalisation avant que les échanges ne commencent.

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Avez-vous évalué des élèves de différentes classes ? *

Oui

Non

Si oui, ces différences étaient visibles lors des débriefings

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord

Tout à fait d'accord

Selon vous, quelle est la durée idéale pour ce temps d'échanges ?

h min s

__ : __ : __

Ce temps d'échange doit se faire directement après la session en réalité virtuelle

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord

Tout à fait d'accord

Ce temps d'échange est nécessaire à la compréhension de la réalisation de l'élève

C'est à dire, est-ce qu'il faut ce temps d'échange pour bien comprendre pourquoi l'élève a fait telle ou telle action ?

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Cette méthode d'évaluation peut être mise en place facilement en conditions réelles (classe) *

(débriefing)

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Cette méthode peut être utilisée pour faire du travail en groupe *

(débriefing)

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Cette méthode peut être utile pour laisser les élèves utiliser la réalité virtuelle en autonomie

Par exemple on peut imaginer avoir 2 élèves qui utilisent la RV en autonomie sans l'intervention d'un enseignant

0 1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Comparaison des méthodes

Quelle méthode d'évaluation avez-vous le plus apprécié ? *

- Temps réel
- Débriefing
- Les deux se valent

Selon vous, quelle méthode est la plus facile à mettre en place pour une utilisation en classe ? *

- Temps réel
- Débriefing
- Les deux se valent

Selon vous, quelle méthode est la plus intéressante d'un point de vue pédagogique ? *

- Temps réel
- Débriefing
- Les deux se valent

D'après-vous, quelle méthode est la plus riche d'un point de vue pédagogique ? *

- Temps réel
- Débriefing
- Les deux se valent

D'après vous, quelle méthode est la plus enrichissante pour les élèves ?

- Temps réel
- Débriefing
- Les deux se valent

Avez-vous des remarques au sujet de la méthode "temps réel" ?

Votre réponse _____

Avez-vous des remarques au sujet de la méthode "débriefing" ?

Votre réponse _____

Avez-vous d'autres remarques ?

Votre réponse _____

FICHIERS DE DONNÉES JSON

```
1  "steps": [  
2    {  
3      "startTime": 206.2794,  
4      "autoValidationEndTime": 220.7913,  
5      "userValidationEndTime": 220.7913,  
6      "stepAutoValidated": true,  
7      "stepUserValidated": true,  
8      "autoValidation": false,  
9      "stepID": "DefaultStepIDs, MSG_WELCOME",  
10     "stepName": "Début de l'activité guidée",  
11     "stepType": "ValidateManualTrackerStep",  
12     "hasSettings": false,  
13     "settingsType": "TrackerStepSettingsBase",  
14     "settingsData": "none"  
15   },  
16   {  
17     "startTime": 222.004,  
18     "autoValidationEndTime": 279.0668,  
19     "userValidationEndTime": 315.2155,  
20     "stepAutoValidated": true,  
21     "stepUserValidated": true,  
22     "autoValidation": false,  
23     "stepID": "PlanningStepIDs, GOTO_SHELVES",  
24     "stepName": "Observer la zone de travail",  
25     "stepType": "GoToCubicAreaStep",  
26     "hasSettings": true,  
27     "settingsType": "GoToCubicAreaSettings",  
28     "settingsData": {  
29       "containsPath": true,  
30       "areaName": ""  
31     }  
32   },  
33 ]
```

Listing 1 – Exemple de données JSON générées par le *Tracker*.

```

1 {   "settings": {
2     "baseVersion": 6,
3     "isDefaultSettings": true,
4     "userLevel": 1,
5     "useTutorial": true,
6     "settingsDirections": "Vous devez `<b>remplacer</b>` une ancienne promotion par une opération de
    ↪ mise en valeur de la `<b>nouvelle collection</b>`. Rendez-vous auprès de la `<b>tête de
    ↪ gondole en surbrillance</b>` afin d'observer la disposition actuelle du mobilier. Les nouveaux
    ↪ produits se trouvent `<b>dans la réserve sur une palette au sol</b>`. Une fois l'implantation
    ↪ réalisée, vous devrez déposer les éléments (cartons de produits, PLV, ...) de `<b>l'ancienne
    ↪ promotion en réserve dans le rack `Retour fournisseurs`</b>`.",
7     "summary": "Afin de préparer une nouvelle promotion, vous devez remplacer les produits existants par
    ↪ ceux de la promotion",
8     "timeSettings": {
9       "useTime": false,
10      "timeLimit": 600,
11      "firstWarningTime": 500,
12      "additionnalTime": 120 },
13     "videoSettings": {
14       "useVideo": false,
15       "codec": "HEVC (NVIDIA)",
16       "resolution": "Natif",
17       "fps": 35 },
18     "settingsVersion": 4,
19     "autoGenerateProducts": true,
20     "usePalletTruck": false,
21     "autoGenerateDirections": false,
22     "hazardsAmount": 0,
23     "overrideCatalogProducts": true,
24     "replaceNews": true,
25     "catalogGuid": "0",
26     "shelveID": "Tête de gondole",
27     "dirtyPlaneRatio": 1,
28     "storeOldProductsInStock": false,
29     "products": [
30       {"version": 2, "hash": -985273511, "elements": [{
31         "version": 1, "hash": -1437954930, "color": "black" }]},
32       "quantities": [4],
33       "specialStates": [0]},
34       {"version": 2, "hash": -82417756, "elements": [{
35         "version": 1, "hash": 392988698, "color": "" }]},
36       "quantities": [3], "specialStates": [0]}] } }

```

Listing 2 – Fichier JSON représentant une variable didactique.

```

1 {   "deviceVERSION": 2,
2     "tabletVERSION": 2,
3     "navigationVERSION": 2,
4     "totalTime": 884.574,

```

```

5     "totalFrames": 73818,
6     "navigation": {
7         "version": 2,
8         "correctTP": 30,
9         "distance": 170.6476,
10        "teleportation": [{
11            "time": 26.88214,
12            "frame": 2377,
13            "side": "Left",
14            "result": "IN_PROGRESS",
15            "pressedTime": 0.063797,
16            "fadeDuration": 0,
17            "totalTimeForTP": 0.063797,
18            "distanceB4TP": 0.005544141,
19            "tpDistance": 0 },
20        { "time": 33.67415,
21            "frame": 2982,
22            "side": "Right",
23            "result": "FAIL",
24            "pressedTime": 3.239029,
25            "fadeDuration": 0,
26            "totalTimeForTP": 3.239029,
27            "distanceB4TP": 0.01505784,
28            "tpDistance": 0 },
29        { "time": 40.63246,
30            "frame": 3590,
31            "side": "Right",
32            "result": "SUCCESS",
33            "pressedTime": 1.903839,
34            "fadeDuration": 0.2007599,
35            "totalTimeForTP": 2.104599,
36            "distanceB4TP": 0.01111988,
37            "tpDistance": 7.908753 } ] },
38    "tablet": {
39        "version": 2,
40        "totalEntries": 43,
41        "correctCount": 37,
42        "correctRatio": 86.04651,
43        "missCount": 6,
44        "missRatio": 13.95349,
45        "correct": [ {
46            "time": 52.0576,
47            "frame": 4462,
48            "side": "Right",
49            "objectName": "HOME_BUTTON-Objets",
50            "objectHash": "E33C3CC0",
51            "selectableType": "Button",
52            "uiParentApplicationType": "null",
53            "currentApplication": "no_application" },
54        { "time": 53.5267,
55            "frame": 4572,

```

```

56     "side": "Right",
57     "objectName": "UP",
58     "objectHash": "161F58C0",
59     "selectableType": "Button",
60     "uiParentApplicationType": "TabletObjectsPickerApplication",
61     "currentApplication": "TabletObjectsPickerApplication" },
62   { "time": 54.1905,
63     "frame": 4671,
64     "side": "Right",
65     "objectName": "Cartons",
66     "objectHash": "96F54380",
67     "selectableType": "Button",
68     "uiParentApplicationType": "TabletObjectsPickerApplication",
69     "currentApplication": "TabletObjectsPickerApplication" },
70   { "time": 61.84393,
71     "frame": 5301,
72     "side": "Right",
73     "objectName": "GrandCarton",
74     "objectHash": "39869800",
75     "selectableType": "Button",
76     "uiParentApplicationType": "TabletObjectsPickerApplication",
77     "currentApplication": "TabletObjectsPickerApplication" } ],
78   "miss": [ {
79     "time": 497.2457,
80     "frame": 42396,
81     "side": "Right",
82     "objectName": "Viewport",
83     "objectHash": "6093D440",
84     "selectableType": "null",
85     "uiParentApplicationType": "TabletDirectionsApplication",
86     "currentApplication": "TabletDirectionsApplication" } ] },
87   "devices": {
88     "version": 2,
89     "grabrelease": [ {
90       "time": 61.84393,
91       "frame": 5301,
92       "side": "Right",
93       "action": "grab",
94       "replayId": "",
95       "deviceName": "deviceSnapping",
96       "deviceType": "DeviceSnapping" },
97     { "time": 66.97191,
98       "frame": 5757,
99       "side": "Right",
100      "action": "release",
101      "replayId": "_010_deviceSnapping_0",
102      "deviceName": "deviceSnapping",
103      "deviceType": "DeviceSnapping" } ],
104     "enterCount": 1452,
105     "exitCount": 298,
106     "clickCount": 518,

```

```

107     "missClickCount": 73,
108     "actionClickDown": 243,
109     "actionClickUp": 234,
110     "releaseClickDown": 14,
111     "releaseClickUp": 14,
112     "teleporterClickDown": 46,
113     "teleporterClickUp": 46,
114     "interactions": [ {
115         "time": 42.65343,
116         "frame": 3771,
117         "side": "Right",
118         "action": "ENTER",
119         "replayId": "_0003_user-device-right-default",
120         "deviceName": "DeviceDefault",
121         "targetName": "Porte_employes01",
122         "targetType": "RotatingDoor",
123         "actionClickDown": false,
124         "actionClickUp": false,
125         "releaseClickDown": false,
126         "releaseClickUp": false,
127         "teleporterClickDown": false,
128         "teleporterClickUp": false },
129     { "time": 44.00659,
130         "frame": 3892,
131         "side": "Right",
132         "action": "CLICK_STAY",
133         "replayId": "_0003_user-device-right-default",
134         "deviceName": "DeviceDefault",
135         "targetName": "Porte_employes01",
136         "targetType": "RotatingDoor",
137         "actionClickDown": false,
138         "actionClickUp": false,
139         "releaseClickDown": false,
140         "releaseClickUp": false,
141         "teleporterClickDown": true,
142         "teleporterClickUp": false },
143     { "time": 44.15096,
144         "frame": 3905,
145         "side": "Right",
146         "action": "CLICK_STAY",
147         "replayId": "_0003_user-device-right-default",
148         "deviceName": "DeviceDefault",
149         "targetName": "Porte_employes01",
150         "targetType": "RotatingDoor",
151         "actionClickDown": false,
152         "actionClickUp": false,
153         "releaseClickDown": false,
154         "releaseClickUp": false,
155         "teleporterClickDown": false,
156         "teleporterClickUp": true },
157     { "time": 44.50177,

```

```
158     "frame": 3935,  
159     "side": "Right",  
160     "action": "EXIT",  
161     "replayId": "_0003_user-device-right-default",  
162     "deviceName": "DeviceDefault",  
163     "targetName": "Porte_employes01",  
164     "targetType": "RotatingDoor",  
165     "actionClickDown": false,  
166     "actionClickUp": false,  
167     "releaseClickDown": false,  
168     "releaseClickUp": false,  
169     "teleporterClickDown": false,  
170     "teleporterClickUp": false } ] }  
171 }
```

Listing 3 – Fichier de statistique généré en fin d’activité et exploité pour l’analyse statistique de l’expérimentation.

Titre : Conception et évaluation d'environnements virtuels pédagogiques : Application à la formation professionnelle

Mot clés : Réalité Virtuelle ; Formation Professionnelle ; Conception de scénarios pédagogiques ; Approches génériques ; Évaluations pédagogiques

Resumé : Le système éducatif français revendique une transition vers le numérique dans le cadre des apprentissages. L'utilisation du numérique est un bon moyen pour les acteurs de la formation professionnelle de promouvoir et de proposer de nouvelles méthodes pédagogiques. En effet, ces filières souffrent d'un manque de moyens pour proposer des situations d'apprentissages professionnelles concrètes aux apprenants. Grâce aux avancées techniques, la Réalité Virtuelle (RV) est désormais accessible au plus grand nombre ; ces usages permettent de proposer des simulations d'apprentissages multiples et adaptées aux situations professionnelles.

Cette thèse porte sur la conception et l'évaluation d'environnements virtuels (EV) dans un contexte de formation professionnelle. La création d'un environnement de formation utilisable en conditions réelles dans les lycées professionnels demande des compétences variées, comme en pédagogie, à propos du métier ciblé ou encore sur le profil des élèves et des enseignants. Nous développons dans ce manuscrit différentes approches permettant de transcrire une situation professionnelle emblématique en un support de formation virtuel pertinent. Pour le développeur, la complexité réside dans le fait que la simulation doit correspondre à la fois aux élèves

et aux enseignants. L'industrialisation de la conception d'EVs doit passer d'une part, par une optimisation des procédés de création informatique et d'autre part la considération des attentes pédagogiques des enseignants. Nous proposons une approche de développement informatique d'outils génériques permettant d'adapter rapidement la création de scénarios virtuels dans plusieurs domaines. Parmi ces outils, nous proposons des interactions génériques multisupports ou un assistant virtuel qui fait office de facilitateur dans le monde virtuel.

Également, le profil des élèves est à prendre en compte lors de la conception des EVs, notamment vis-à-vis du choix des interactions en procédant à des étapes d'étayages permettant d'enlever les éléments peu pertinents sur le plan de la didactique au profit de tâches pédagogiques plus enrichissantes.

Nous développons dans cette thèse différentes approches d'exploitation de la technologie ainsi que des techniques d'évaluation à mettre en place avec les élèves. Ces discussions sont appuyées par des expérimentations menées dans les lycées afin de valider les différentes approches techniques et pédagogiques utilisées.

Title : Designing and evaluating pedagogical virtual environments : Application to vocational training

Keywords : Virtual Reality ; Vocational Training ; Designing pedagogical scenarios ; Generic approaches ; Pedagogical evaluations

Abstract : The French educational system claims a digital transition. Using digital means is a good way for vocational training professionals to promote new pedagogical approaches. Vocational training suffers from a lack of means to offer new training situations. Thanks to technological improvements, Virtual Reality (VR) is now open to the public. It allows multiple relevant pedagogical simulations that are tailored to the professional world.

This thesis is about designing and evaluating virtual environments (VE) in a vocational training context. The design of a training environment implies a high skill diversity for the designer to be usable in real conditions in schools. Like pedagogy for the targeted job or knowledge about students or teachers' profiles. We expand in this manuscript several approaches that allow transcribing a real pedagogical situation into a relevant virtual scenario. For the developer, the complexity of the digitalization process relies on the need for the

virtual situation to be suitable for both students and teachers. We propose a generic programming approach, allowing to quickly adapt the design process of a new virtual training scenario. For instance, we propose multi-support generic interactions or a virtual assistant to ease virtual interactions for the trainee.

Additionally, students' profiles need to be considered while designing the VR, especially regarding the choices of interactions by simplifying steps. Allowing the designer to remove didactic irrelevant parts for the benefit of more enlightening pedagogical actions.

We expand in this thesis some exploitation approaches of VR in a real training context as well as evaluation techniques to assess students. Those discussions are supported by experimental results conducted in high schools to validate our technical and pedagogical approaches detailed in this manuscript.