



Méthodes et outils pour la création et l'évaluation de situations d'apprentissage de gestes en environnements virtuels

Djadja Jean Delest Djadja

► To cite this version:

Djadja Jean Delest Djadja. Méthodes et outils pour la création et l'évaluation de situations d'apprentissage de gestes en environnements virtuels. Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain. Le Mans Université, 2023. Français. NNT : 2023LEMA1002 . tel-04192353

HAL Id: tel-04192353

<https://theses.hal.science/tel-04192353>

Submitted on 31 Aug 2023

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

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

THÈSE DE DOCTORAT DE

LE MANS UNIVERSITÉ

ÉCOLE DOCTORALE N° 601
*Mathématiques et Sciences et Technologies
de l'Information et de la Communication*
Spécialité : *Informatique (CNU 27)*

Par

« Djadja Jean Delest DJADJA »

**« Méthodes et outils pour la création et l'évaluation de situations
d'apprentissage de gestes en environnements virtuels »**

Thèse présentée et soutenue à « Laval », le « 11 janvier 2023 »

Unité de recherche : « LIUM »

Thèse N° : 2022LEMA1024

Rapporteurs avant soutenance :

Jean-Pierre JESSEL Professeur à l'Université Toulouse III Paul Sabatier
Ronan QUERREC Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest

Composition du Jury :

Présidente :	Domitile LOURDEAUX	Professeure à l'Université Technologique de Compiègne
Examineurs :	Ronan QUERREC	Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest
	Domitile LOURDEAUX	Professeure à l'Université Technologique de Compiègne
	Jean-Pierre JESSEL	Professeur à l'Université Toulouse III Paul Sabatier
	Dominique BECHMANN	Professeure à l'Université de Strasbourg
Dir. de thèse :	Sebastien GEORGE	Professeur des Universités à l'Université du Mans
Encadrant :	Ludovic HAMON	Maître de conférences à l'Université du Mans

REMERCIEMENTS

Je remercie mes encadrants, *Sébastien George* et *Ludovic Hamon*, pour m'avoir accepté et thèse, pour l'encadrement de cette thèse, les conseils toujours pertinents, et surtout leur patience durant toutes ces années.

Je tiens à remercier l'ensemble des collègues doctorants, ex-doctorants, docteurs ou post-doctorants rencontrés durant ces années de thèse : *Inès, Damien, Vincent, Sebastian, Berenice, Oussema, Claire, Dalal, Ibtissem*, pour les moments passés ensemble au CERIUM². Je souhaite particulièrement remercier le *Dr. Quentin Couland* pour son aide et son appui à la fois technique et moral, surtout lors de ces dernières années.

Merci à tous les membres de *l'équipe IEIAH* et plus largement du *LIUM* pour leur accueil. Je remercie également tous mes collègues de *l'IUT de Laval*, en particulier ceux du *département Informatique*. Un grand merci au *service administratif de l'IUT de Laval* également, grâce à qui toutes mes démarches administratives se sont toujours très bien passées. Enfin je voudrais remercier Madame *Lourdais* et Madame *Tiger* du département de biologie pour leurs participations et implications dans l'une des expérimentations réalisées.

Merci également à tous mes amis, pour m'avoir permis de passer des moments agréables durant toutes ces années : *Étienne, Nathan, Stéphane, Pascal, Carlos, Assetou, Philippe*, et tous les autres. En outre, je tiens à dire un grand merci à ma famille pour ses encouragements, et en particulier ma *mère* pour m'avoir toujours soutenu. Sans leur soutien, rien de tout ça n'aurait été possible.

DÉDICACES

“Je dédie ce travail à mère. Tu es ma force, mon inspiration. Maman je t’aime...”

SOMMAIRE

I	Contexte	17
1	Introduction	19
1.1	Contexte : réalité virtuelle et apprentissage de gestes	19
1.2	Problématique de recherche	22
1.2.1	Verrous scientifiques et technologiques	22
1.2.2	Questions de recherche	24
1.2.3	Hypothèses de recherche	24
1.3	Aperçu des contributions	25
1.4	Organisation du manuscrit	26
II	État de l’art	29
2	Du geste à son exploitation dans les Environnements Virtuels pour l’Apprentissage Humain	31
2.1	Gestes et Mouvements	31
2.1.1	Techniques de capture du mouvement	32
2.1.2	Définitions : geste et mouvement	35
2.1.3	Représentations du mouvement	36
2.2	Environnements virtuels dédiés à l’apprentissage de gestes	40
2.2.1	Les environnements virtuels immersifs et la boucle d’interaction . .	40
2.2.2	Environnements virtuels dédiés à l’apprentissage humain : les EVAH	42
2.2.3	Les EVAH dédiés à l’apprentissage de gestes	45
2.3	Conclusion	51
3	Analyse des EVAH dédiés aux gestes	53
3.1	Méthode de recherche bibliographique	53
3.2	Évaluation dans les EVAH dédiés aux gestes	57
3.2.1	Définition, acteurs, objets et objectifs	57
3.2.2	Types d’analyse de la performance et des compétences motrices . .	63

3.3	Les métriques dans les EVAH dédiés aux gestes	68
3.4	Les feedbacks dans les EVAH dédiés aux gestes	75
3.4.1	Définitions et généralités	75
3.4.2	Exemples de feedbacks pédagogiques	77
3.5	Réingénierie des EVAH dédiés aux gestes	83
3.6	Conclusion	87

III Contributions 89

4 Réingénierie des EV pour l'apprentissage de gestes 91

4.1	Motion Evaluation in Virtual Environment for Learning (MEVEL)	92
4.1.1	Mise en place de situations d'apprentissage dédiées aux gestes	92
4.1.2	Extraction et évaluation des mouvements d'intérêt	95
4.2	Interfaces, architecture et implémentation	97
4.2.1	Interactions Humain-Machine (IHM)	97
4.2.2	Intégration et traitement des EV	99
4.3	Traitements des données du mouvement	102
4.3.1	Matériel	102
4.3.2	Format des données	103
4.4	Expérimentation : étude du système MEVEL	103
4.4.1	Protocole	104
4.4.2	Résultats	106
4.4.3	Discussions	111
4.5	Conclusion	112

5 Support à la création de feedbacks pédagogiques orientés gestes en EV 115

5.1	Modèle descriptif de feedbacks pédagogiques pour l'apprentissage de gestes en RV	116
5.1.1	Les feedbacks	117
5.1.2	Les déclencheurs	118
5.1.3	Instance du modèle au format JSON	120
5.2	GEstural FEedback EDitor (GEFEED)	121
5.2.1	Situation d'apprentissage : dilution d'une suspension en microbiologie	122
5.2.2	Architecture et implémentation	123

5.2.3	Interface et interactions	125
5.3	Expérimentation : étude du système GEFEED	128
5.3.1	Protocole et participants	128
5.3.2	Résultats	131
5.3.3	Discussion	140
5.4	Conclusion	141
6	Évaluation d'un EV adapté à l'apprentissage de gestes	145
6.1	Configuration de l'EVAH	146
6.2	Protocole	148
6.3	Résultats	150
6.3.1	Démarche d'analyse statistique	150
6.3.2	Temps de réalisation de la tâche	152
6.3.3	Compétences gestuelles	157
6.3.4	Respect des séquences d'actions identifiées par le système MEVEL .	169
6.3.5	Questionnaires : rétention des séquences d'actions, auto-évaluation et évaluation par la méthode des juges	170
6.3.6	Utilisabilité	180
6.4	Discussion	182
6.5	Conclusion	185
IV	Conclusion	189
7	Conclusion générale et perspectives	191
7.1	Synthèse des travaux	191
7.2	Limites et perspectives	194
7.2.1	Améliorations fonctionnelles et IHM	194
7.2.2	Analyse et exploitation des traces	195
7.2.3	Extraction des valeurs d'acceptabilités des métriques	195
7.2.4	Améliorations et recommandations de feedbacks pédagogiques . . .	197
7.2.5	Génération automatique des configurations des CP pour la décom- position en séquence de la tâche	197
7.2.6	Expérimentations supplémentaires	199
	Bibliographie	201

Annexes	224
A Numérotation des articles de l'analyse bibliographique	224
B Transformations des données	226
C Questionnaire sur l'expérimentation du lancer de fléchettes, billard et écriture d'une lettre	229
D Instructions suivies dans l'expérimentation portant sur la dilution d'une suspension de microbiologie	233
E Objectifs pédagogiques troisième partie	236
F Questionnaire F-SUS	237
G Questionnaire sur l'analyse des concepts utilisés dans l'éditeur de feedback	241
H Décomposition du protocole portant sur la dilution d'une suspension de microbiologie	246
I Questionnaire sur l'analyse de l'ordre des actions	248
J Questionnaire sur l'auto-évaluation des apprenants	251
K Questionnaire sur l'évaluation des apprenants	254
L Tableaux complets des tests statistiques	257

TABLE DES FIGURES

2.1	(a) marqueurs passifs (FURTADO <i>et al.</i> , 2013) (b) marqueurs actifs (KIRK <i>et al.</i> , 2005)	32
2.2	Exemple de dispositif haptique : <i>Geomatic Touch</i> . Il permet de capturer les coordonnées (x, y, z) et la direction du stylet. De plus, il peut générer une force s’opposant à la main de l’utilisateur, permettant la simulation du toucher et des interactions avec des objets virtuels. (MIKI <i>et al.</i> , 2016) . . .	34
2.3	Exemple de la notation du mouvement de <i>Laban</i> , de gauche à droite : marche neutre, robot humanoïde HRP-4, Chimpanzé, Aimee Mullins - mannequin et athlète amputé sous les genoux (ABE, 2016)	37
2.4	Exemple de squelette humain 3D représenté sous la forme d’un graphe (COULAND, 2020)	38
2.5	La boucle « perception, cognition, action » des environnements virtuels . .	41
2.6	Un EVAH collaboratif dans le domaine des urgences paramédicales. En haut à gauche : un utilisateur mesure la pression artérielle ; en haut à droite : deux utilisateurs échangent des outils dans une situation de coopération ; en bas à gauche : la découpe des vêtements du patient est effectuée à l’aide d’une interface graphique montrant le délai utilisé pour réaliser la tâche en temps réel ; en bas à droite : la vue du formateur permet de modifier les symptômes du patient en temps réel (SCHILD <i>et al.</i> , 2018)	44
2.7	Une personne jonglant en RV (à gauche). Application de jonglage en RV (à droite) (ADOLF <i>et al.</i> , 2019)	46
2.8	Rouge : tracés de tous les points des mouvements d’insertion dans le groupe 1. Noir : La trajectoire prototypique idéale. Vert : La meilleure insertion correspondant étroitement au prototype. Violet : La pire insertion la plus éloignée du prototype (VAUGHAN <i>et al.</i> , 2020)	48
2.9	Matériel d’analyse de mouvement fixé à une raquette de tennis (à gauche) et au corps d’un participant (à droite) (SAITO <i>et al.</i> , 2018)	49
2.10	Proposition d’une boucle d’interaction spécifique aux EVAH dédiés aux gestes	50

TABLE DES FIGURES

3.1	Organigramme du processus de sélection des articles associés aux publications d'EVAH dédiés à l'apprentissage de gestes	55
3.2	Tendance des publications sur l'apprentissage du geste en fonction des domaines depuis 2010	57
3.3	Exemple d'un apprenant réalisant certaines actions du scénario (BELLARBI <i>et al.</i> , 2019)	59
3.4	Répartitions des évaluations réalisées en fonction des entités évaluées . . .	61
3.5	Évaluation des apprenants dans les EVAH répartis sur 4 domaines	61
3.6	Évaluations dans les EVAH	62
3.7	Objets d'Intérêts (OI) impliqués dans les évaluations	64
3.8	Visualisation des mouvements superposés (Les os gris appartiennent à un apprenant. Les os jaunes appartiennent à un expert). (a) Montre les prochaines trajectoires des articulations cibles (courbes rouges) (b) Montre les os d'erreur de l'apprenant (os rouges) (YOSHINAGA <i>et al.</i> , 2018)	66
3.9	Simulation pour l'apprentissage de la menuiserie (JOSE <i>et al.</i> , 2016)	70
3.10	Graphe des différentes catégories de métriques	71
3.11	Illustration du schéma de l'examen et résumé des principales conclusions des travaux de SIGRIST <i>et al.</i> (2012). La figure montre l'efficacité confirmée expérimentalement (trait continu) et les hypothèses (guidage et spécificité) formulées par SIGRIST <i>et al.</i> (2012) (en pointillés) sur l'efficacité d'une stratégie de feedback pour améliorer l'apprentissage moteur en fonction de la complexité de la tâche fonctionnelle. Plus la forme est large, plus la stratégie est efficace.	76
3.12	Visualisation de feedbacks sur le corps (LIU <i>et al.</i> , 2020b)	77
3.13	(a) Différents types de tenons (b) Tenon en vert lorsqu'il est bien fixé par l'apprenant (CHEN <i>et al.</i> , 2019).	78
3.14	Proportions d'articles utilisant les différentes modalités de feedbacks	79
3.15	Proportions de déclencheurs en fonction de différentes modalités de feedbacks	80
3.16	Exemple d'apprentissage par observation et imitation dans le cadre du football américain (LE NAOUR <i>et al.</i> , 2019)	84
4.1	Processus de mise en place d'une situation d'apprentissage dédiée aux gestes dans les EVAH	93
4.2	(gauche) Tâche de manipulation du verre; (droite) Affichage des métriques dans l'EVAH	93

4.3	Automate fini pour la démonstration de l'utilisateur final et l'évaluation de l'apprenant avec un ICP	95
4.4	Interfaces graphiques pour la mise en place d'une situation d'apprentissage dédiée aux gestes	98
4.5	(Gauche) Interaction de sélection des OI et une étape (contour vert) sélectionnée; (Droite) Menu principal de l'apprenant	99
4.6	Architecture du système <i>MEVEL</i>	100
4.7	HTC Vive	102
4.8	Exemple de fichier contenant des données sur le mouvement	103
4.9	(gauche) Tâche de navigation, vue du dessus, dans laquelle l'apprenant doit marcher du SCP au ECP en respectant les trajectoires; (droite) Tâche de lancer de balles dans laquelle l'utilisateur doit lancer une balle dans la corbeille (DJADJA <i>et al.</i> , 2019)	104
4.10	(à gauche) Ligne de positionnement (rouge) de l'apprenant et cible dans la simulation de fléchettes, (au milieu) Boule blanche, boule orange et queue dans la simulation de billard, (à droite) Stylet virtuel, papier et bureau dans la simulation d'écriture	105
4.11	Lancer de fléchettes : exemples de positionnement des CP et de la trajectoire de l'OI	107
4.12	Billard : exemples de positionnement des CP et de la trajectoire de l'OI . .	109
4.13	Résultats des réponses des participants au questionnaire - de la pire (1) à la meilleure (4) appréciation, (5) sans opinion	111
5.1	Diagramme UML du modèle descriptif des feedbacks pédagogiques orientés vers l'apprentissage de gestes	
5.2	Exemple de deux feedbacks (haptique et visuel) avec deux déclencheurs (spatial et de contact) décrits dans le format JSON	117
5.3	Un EVAH pour l'apprentissage de la dilution d'une suspension de microbiologie	121
5.4	Architecture logique de haut niveau du système GEFEEED	122
5.5	Interface graphique du système GEFEEED	124
5.6	Étapes et observation de la création d'un feedback et d'un déclencheur . .	125
5.7	Objet virtuel sélectionné en EV avec le système GEFEEED	127
5.8	Participant en train de flamber l'entrée du tube à essai, objectif pédagogique 1, partie 1	128
		129

TABLE DES FIGURES

5.9	Réponses des participants au questionnaire sur les feedbacks (a) et les déclencheurs (b) dans le contexte de la dilution	135
5.10	Réponses au questionnaire sur les feedbacks (a) et les déclencheurs (b) dans d'autres contextes	137
5.11	Questionnaire sur l'atteinte des objectifs pédagogiques	138
5.12	Moyenne du score F-SUS (en rouge) obtenue	139
6.1	Quelques exemples de configurations (CP, OI et trajectoire) des étapes de la tâche de dilution	147
6.2	Les différents groupes créés dans le cadre de l'expérimentation	149
6.3	Dispositions des éléments nécessaires à la réalisation d'une dilution	150
6.4	Description d'une boîte à moustache	152
6.5	Moyennes et écarts-types du temps (en secondes) utilisé pour réaliser la tâche	153
6.6	Moyennes intergroupes des durées de la tâche (en secondes)	154
6.7	Moyennes intragroupes des durées de la tâche (en secondes)	156
6.8	Moyennes intergroupes des ratios pour la compétence « tube et pipette à la verticale »	160
6.9	Moyennes intragroupes des ratios pour la compétence « tube et pipette à la verticale »	161
6.10	Moyennes intergroupes des ratios pour la compétence « pipette à l'horizontale »	163
6.11	Moyennes intragroupes des ratios pour la compétence « pipette à l'horizontale »	164
6.12	Moyennes intergroupes des ratios pour la compétence « pipette à la verticale »	167
6.13	Moyennes intragroupes des ratios pour la compétence « pipette à la verticale »	168
6.14	Résultats du questionnaire d'auto-évaluation des compétences procédurales	174
6.15	Résultats du questionnaire d'auto-évaluation des compétences gestuelles . .	175
6.16	Moyennes des réponses du questionnaire d'évaluation des compétences procédurales des deux experts	179
6.17	Moyennes des réponses du questionnaire d'évaluation des compétences gestuelles des deux experts	180
6.18	Moyennes de score F-SUS (en rouge) obtenu	182
7.1	Quelques exemples de CP (en bleu) et de prédictions d'ICP (en vert) . . .	198
A.1	Changement de repère du monde virtuel au SCP	226

LISTE DES TABLEAUX

3.1	Classification des métriques de l'étude bibliographique. Les numéros de la colonne "Articles" correspondent à des articles dont les références se trouvent dans le tableau en annexe A	74
3.2	Exemples de feedbacks, déclencheurs et leurs propriétés utilisées dans divers contextes. Les numéros de la colonne "Articles" correspondent à des articles dont les références se trouvent dans le tableau en annexe A	82
4.1	Questionnaire sur l'expérimentation du lancer de fléchettes, du tir au billard et de l'écriture d'une lettre	110
5.1	Les feedbacks et leurs propriétés	118
5.2	Les déclencheurs et leurs propriétés	120
5.3	Feedbacks choisis pour la 2 ^{ème} phase de l'expérimentation	132
5.4	Déclencheurs choisis pour la 2 ^{ème} phase de l'expérimentation	132
5.5	Corrélation entre les feedbacks et les déclencheurs choisis pour la 2 ^{ème} phase de l'expérimentation	132
5.6	Feedbacks choisis pour la 3 ^{ème} phase de l'expérimentation	133
5.7	Déclencheurs choisis pour la 3 ^{ème} phase de l'expérimentation	133
5.8	Corrélation entre les feedbacks et les déclencheurs choisis pour la 3 ^{ème} phase de l'expérimentation	134
5.9	Questions sur l'utilité des feedbacks et des déclencheurs avec l'EVAH portant sur la dilution	135
5.10	Questions sur l'utilité des feedbacks et des déclencheurs dans d'autres contextes	136
5.11	Questions sur les objectifs pédagogiques	137
5.12	Questions du modèle F-SUS	139
5.13	Scores F-SUS obtenus pour les 10 participants	139
6.1	Résumé des étapes du protocole de dilution	147

6.2	Moyennes (\bar{x}) et écarts-types (σ) du temps (en secondes) utilisé pour réaliser la tâche	153
6.3	Résultats des tests statistiques en intergroupe (moyenne des temps utilisés pour réaliser la tâche)	155
6.4	Résultats des tests statistiques en intragroupe (moyenne des temps utilisés pour réaliser la tâche)	155
6.5	Moyennes (\bar{x}) et écarts-types (σ) des ratios de la compétence « tube et pipette à la verticale »	159
6.6	Résultats des tests statistiques en intergroupe pour la compétence « tube et pipette à la verticale »	159
6.7	Résultats des tests statistiques en intragroupe pour la compétence « tube et pipette à la verticale »	161
6.8	Moyennes (\bar{x}) et écarts-types (σ) des ratios pour la compétence « pipette à l'horizontale »	162
6.9	Résultats des tests statistiques en intergroupe pour la compétence « pipette à l'horizontale »	164
6.10	Résultats des tests statistiques en intragroupe pour la compétence « pipette à l'horizontale »	165
6.11	Moyennes (\bar{x}) et écarts-types (σ) des ratios pour la compétence « pipette à la verticale »	166
6.12	Résultats des tests statistiques en intergroupe pour la compétence « pipette à la verticale »	166
6.13	Résultats des tests statistiques en intragroupe pour la compétence « pipette à la verticale »	168
6.14	Nombre de participants ayant manqué des ICP aux étapes 3 et 7	170
6.15	Questions sur le prélèvement	171
6.16	Questions sur l'injection	171
6.17	Résultats du questionnaire sur le respect des étapes (nombres de mauvaises réponses)	171
6.18	Questionnaire d'auto-évaluation des compétences procédurales	173
6.19	Questionnaire d'auto-évaluation des compétences gestuelles	173
6.20	Questionnaire d'évaluation des compétences procédurales	177
6.21	Questionnaire d'évaluation des compétences gestuelles	177
6.22	Interprétation de la force de l'accord (LANDIS <i>et al.</i> , 1977)	178

6.23	Scores de Cohen des questionnaires sur les compétences procédurales et gestuelles	178
6.24	Questions du modèle F-SUS (GRONIER <i>et al.</i> , 2021)	181
6.25	Scores F-SUS obtenus pour les 45 participants	181
6.26	Moyennes et écarts-types du score F-SUS obtenus pour les 3 groupes . . .	182
A.1	Numérotation des articles de l'étude bibliographique réalisée au chapitre 3	225
A.2	Ensemble des objectifs pédagogiques définis par les enseignants dans la partie 3 de l'expérimentation du chapitre 5	236
A.3	Résultats des tests statistiques en intergroupe (temps utilisé pour réaliser la tâche)	257
A.4	Résultats des tests statistiques en intragroupe (temps utilisé pour réaliser la tâche)	257
A.5	Résultats des tests statistiques en intergroupe de la compétence « tube et pipette à la verticale »	258
A.6	Résultats des tests statistiques en intragroupe de la compétence « tube et pipette à la verticale »	258
A.7	Résultats des tests statistiques en intergroupe de la compétence « pipette à l'horizontale »	258
A.8	Résultats des tests statistiques en intragroupe de la compétence « pipette à l'horizontale »	259
A.9	Résultats des tests statistiques en intergroupe de la compétence « pipette à la verticale »	259
A.10	Résultats des tests statistiques en intragroupe de la compétence « pipette à la verticale »	259

ACRONYMES

CP	points de contrôle (<i>CheckPoints</i>)
DTW	<i>Dynamic Time Warping</i>
ECP	<i>Ending CP</i>
EV	Environnement Virtuel
EVAH	Environnement Virtuel pour l'Apprentissage Humain
EIAH	Environnement Informatique pour l'Apprentissage Humain
GEFEED	<i>Gestural FEedback EDitor</i>
ICP	<i>Intermediate CP</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment (IDE)</i>
IHM	Interactions Humain-Machine
MEVEL	<i>Motion Evaluation in Virtual Environment for Learning</i>
MOI	MOuvements d'Intérêts
OI	Objets d'Intérêt
RV	Réalité Virtuelle
SCP	<i>Starting CP</i>

PREMIÈRE PARTIE

Contexte

INTRODUCTION

Ce chapitre introduit le contexte de cette thèse portant sur la réingénierie des Environnements Virtuels (EV) pour l'Apprentissage Humain (EVAH) adaptés aux gestes. Actuellement, plusieurs travaux de recherche contribuent à ce sujet. Cependant, peu d'entre eux prennent en compte les besoins des enseignants ainsi que les aspects liés à la réingénierie pour la réutilisation de ce type d'environnements. Ainsi, dans nos travaux, nous étudierons les pratiques utilisées dans les EVAH dédiés aux gestes en vue de fournir des modèles, des méthodes et des outils qui permettront aux enseignants de concevoir et faire évoluer des EVAH selon leurs pratiques pédagogiques. Dans ce chapitre d'introduction, nous présentons le contexte puis les problématiques de recherche que soulèvent ces travaux. À la suite de cela, nous présentons les contributions apportées et concluons ce chapitre par la présentation de l'organisation de ce manuscrit.

1.1 Contexte : réalité virtuelle et apprentissage de gestes

L'apprentissage des gestes occupe une place importante dans plusieurs métiers et cultures (*ex.* la fabrication de sabres, la porterie, le tissage manuel, etc.). De même, dans notre quotidien, les gestes occupent une place importante. On peut citer à titre d'exemple les gestes de premiers secours dont l'apprentissage est intégré à plusieurs niveaux du cursus scolaire¹. Les problématiques liées à l'apprentissage de gestes font l'objet de plusieurs études (SCHUBAUER *et al.*, 2004 ; MARCELO *et al.*, 2017 ; BRIÈRE, 2020). Cependant, il existe encore de nombreux verrous technologiques et scientifiques représentant des freins à la formalisation, la numérisation et l'exploitation de ce savoir-faire (MANITSARIS *et al.*, 2017). Plusieurs études reposant sur diverses technologies (vision par ordinateur, capture des mouvements, réalité augmentée, etc.), tentent d'y apporter des solutions. Parmi eux,

1. <https://eduscol.education.fr/document/1015/download?attachment>

on peut noter les travaux en Réalité Virtuelle (RV). La RV est définie par FUCHS *et al.* (2006) comme « *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 un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs* ». De nombreuses simulations ont été construites pour des domaines d'applications divers et variés, par exemple, la santé (PIETTE *et al.*, 2012 ; RAJESWARAN *et al.*, 2018 ; BLUMSTEIN *et al.*, 2020), le sport (MORAIS *et al.*, 2011 ; HAMENT *et al.*, 2017 ; WU *et al.*, 2020), la formation (MARION *et al.*, 2007 ; ORDAZ *et al.*, 2015 ; LOURDEAUX *et al.*, 2017 ; LIOU *et al.*, 2018), l'architecture (PORTMAN *et al.*, 2015 ; LO *et al.*, 2019) , l'industrie (GALLEGOS-NIETO *et al.*, 2017 ; NUMFU *et al.*, 2019), etc. Dans ces travaux de thèse, nous nous intéressons à l'utilisation de la RV pour l'apprentissage de gestes. En effet, la RV représente une alternative aux formations traditionnelles, ces dernières pouvant s'avérer coûteuses, complexes à mettre en place, et risquées pour les apprenants (MIGNOT *et al.*, 2021). En outre, l'approche traditionnelle peut nécessiter une logistique lourde pour l'organisation pédagogique, par exemple la préparation (répétitive) de matériels pour des travaux pratiques en chimie ou en biologie. Certains environnements de formations traditionnelles sont onéreux à reproduire, par exemple, dans le domaine de l'aviation pour la formation des pilotes. Outre ces aspects complexes et onéreux que peut pallier la RV, les Environnements Virtuels (EV) permettent aussi aux apprenants de s'entraîner de manière répétitive en toute sécurité et avec davantage d'autonomie. Par ailleurs, la RV peut favoriser l'acquisition et le transfert de compétences (BOSSARD *et al.*, 2008), la rétention d'informations (HALL *et al.*, 1998), la motivation et l'engagement (MOUATT *et al.*, 2020) ainsi que l'amélioration des performances (OAGAZ *et al.*, 2021) des apprenants. En définitive, grâce notamment aux stimuli visuels, sonores et tactiles, la RV apparaît comme un outil pédagogique efficace, adapté à de nombreuses situations d'apprentissage (KHAMALLAH *et al.*, 2020). Les travaux actuels conçoivent des EV très spécifiques et difficilement ré-exploitable par les enseignants. De plus, il faut noter qu'il existe plusieurs sources/sites où l'on peut trouver des EV opérationnels et en libres accès, ce qui constitue des sources potentielles d'EVAH existants à exploiter pour les enseignants. Cependant, la majorité des enseignants étant non informaticiens, sur la base de l'étude des EVAH existants dédiés à l'apprentissage de gestes, notre objectif principal est de fournir des outils techniques, des modèles et des méthodes permettant : (i) d'accompagner les enseignants dans la mise en place ou la réutilisation de situations d'apprentissage dans les EVAH et (ii) d'évaluer et fournir des

aides aux apprenants, le tout en fonction de leurs besoins d’observation et pratiques pédagogiques. Selon HACHET (2003), un Environnement Virtuel (EV) est représenté par une représentation 3D de données réelles ou imaginaires que l’on peut visualiser et avec lesquels on peut interagir en temps réel. Un EVAH représente une situation d’apprentissage opérationnalisée dans un EV. On dit alors que les EVAH représentent un sous-ensemble des EIAH (CORMIER, 2012). Les EIAH correspondent à « *des environnements informatiques conçus dans le but de favoriser l’apprentissage humain, c’est-à-dire la construction de connaissances chez un apprenant. Ce type d’environnement mobilise des agents humains (élève, enseignant, tuteur) et artificiels (agents informatiques, qui peuvent eux aussi tenir différents rôles) et leur offre des situations d’interaction, localement ou à travers les réseaux informatiques, ainsi que des conditions d’accès à des ressources formatives (humaines ou médiatisées)* » (TCHOUNIKINE, 2002). Les EVAH offrent ainsi une expérience sensorielle 3D, dans laquelle les apprenants peuvent interagir, collaborer et par conséquent apprendre des gestes tout en recevant des informations pédagogiques adaptées. Ces informations peuvent provenir de plusieurs sources de données différentes. Néanmoins, dans le contexte de l’apprentissage de gestes en EV, les informations permettant l’évaluation de ces derniers nécessitent des outils permettant leur capture. En effet, la démocratisation des techniques de capture de mouvements a favorisé le suivi de l’activité des apprenants. Ces techniques peuvent utiliser des caméras, des capteurs inertiels, magnétiques ou des systèmes mécaniques par exemple. Il faut cependant noter que l’apprentissage de gestes dans les EVAH nécessite une représentation informatique de ceux-ci. Un geste peut être vu comme étant un mouvement humain auquel est attribuée une signification tandis qu’un mouvement humain est souvent associé aux propriétés géométriques, cinématiques et/ou dynamiques caractérisant un corps (parties du corps humain ou objet manipulé) qui évolue dans le temps et l’espace (*cf.* section 2.1.2). Dans ces travaux, nous nous intéressons au caractère moteur du geste (VADCARD, 2019), c’est-à-dire aux mouvements (*i.e.* positions et orientations dans le temps des parties du corps ou de l’objet manipulé) ainsi qu’aux séquences d’actions sous-jacentes constituant les gestes. Apprendre un geste peut être considéré selon trois points de vue non exclusifs : (a) apprendre l’ensemble des actions constituant une procédure préalablement définie, (b) observer et imiter une succession de postures démontrée par un expert ou (c) construire un geste respectant des propriétés biomécaniques clés connues au préalable. Pour la mise en place d’EVAH et leurs réutilisations dans des situations d’apprentissage de gestes, nous avons considéré les aspects pédagogiques (pratiques et besoins d’observations des enseignants) et technologiques du

point de vue de la réingénierie qu’impliquent leurs conceptions. Nous avons constaté, après une étude des travaux de la littérature, que plusieurs types d’informations sont pris en compte dès la conception des EVAH dédiés aux gestes. Il s’agit entre autres : d’identifier les objets manipulés ou parties du corps liés aux gestes qui seront analysés ou évalués, (ii) les métriques d’évaluations à utiliser, (iii) les informations pédagogiques à fournir aux apprenants en EV. Cependant, il peut être difficile pour des enseignants d’adapter ces EVAH à leurs besoins d’observations, leurs pratiques pédagogiques ou à de nouvelles situations ou contextes pédagogiques. L’intégration d’un système d’analyse et d’évaluation fournissant des informations (susceptibles d’évoluer) à l’apprenant et à l’enseignant dans n’importe quel EVAH existant soulève des défis relatifs à la conception de ces EVAH, leur architecture et les interactions humain-machine pour : (a) la mise en place d’une situation d’apprentissage basée « geste » évaluable et (b) offrir des retours multimodaux pédagogiques pertinents pour l’assistance des apprenants en EV.

1.2 Problématique de recherche

Notre problématique s’inscrit au niveau des modèles, méthodes et outils permettant aux enseignants de mettre en place et de réutiliser des situations d’apprentissages dédiées à l’acquisition et l’amélioration de compétences gestuelles dans les Environnements Virtuels (EV) existants. Cette section présente les verrous scientifiques et technologiques, les questions et hypothèses de recherche identifiés dans ce contexte.

1.2.1 Verrous scientifiques et technologiques

Nous avons identifié à travers la littérature, trois catégories non exclusives d’apprentissages de gestes dans les EVAH : l’apprentissage de séquences d’actions, l’observation et l’imitation de postures ainsi que la construction de gestes respectant des propriétés biomécaniques du mouvement à apprendre. Pour prendre en compte les différentes situations d’apprentissage intégrant ces catégories, il est nécessaire de pouvoir identifier les séquences d’actions ainsi que les informations sur les mouvements réalisés par les apprenants dans chaque séquence. Créer un système permettant la mise en place de situations d’apprentissage des gestes dans les EV considérant ces aspects est une opération complexe, car elle nécessite des connaissances scientifiques avancées en ingénierie des EVAH ainsi qu’en analyse et évaluation des gestes. En général, l’apprenant et l’enseignant ne

possèdent pas de telles connaissances. Ainsi, la décomposition spatiale et temporelle de la tâche à apprendre, quelle que soit la situation d'apprentissage en EV, en une succession d'étapes ou d'actions constituées de séquences rejouables et évaluables, constitue un premier verrou. En effet, l'apprentissage des gestes dans les EVAH nécessite en général de guider l'apprenant, étape par étape, dans la réalisation du geste, mais aussi d'analyser le mouvement à évaluer à chaque étape en fonction des pratiques de l'enseignant. Dans ce contexte, notre objectif est de concevoir et fournir des méthodes et outils intuitifs s'intégrant aux EVAH existants et permettant aux enseignants de mettre en place leur propre processus de décomposition et d'évaluation. Le deuxième verrou est lié à la réutilisation d'EV existant afin d'y associer nos outils. Du point de vue technologique, il existe deux stratégies. Le ou les systèmes conçus peuvent être opérationnalisés sous la forme de *plugins* à ajouter dans les EVAH existant lors de leurs implémentations. Cependant, l'utilisation d'un *plugin* requiert des compétences en informatique que les enseignants ne possèdent pas dans la majorité des cas. Une autre approche, celle choisie dans ces travaux, consiste à importer les EVAH existants au sein d'un système les enrichissant avec des outils permettant aux enseignants de créer leurs propres situations d'apprentissage décomposables et évaluables. Un EV est en général composé de modèles 3D, de scripts d'interactions et de données (sons, images, textes, etc.). Importer un EV dans un nouveau système nécessite que cet EV et donc tous ces éléments constitutifs soient, au préalable, exportés par l'IDE utilisé lors de son implémentation. Cependant, à l'importation, les scripts d'interaction ne sont pas toujours exportables nativement selon la plateforme considérée. En outre, les modifications réalisées dans un EV, telles que l'ajout d'objet 3D lors de son exécution, sont souvent perdues à la fin de cette exécution si ces modifications ne sont pas considérées durant la phase de conception. Enfin, il peut malheureusement y avoir des conflits entre les scripts d'interaction de l'EV et ceux du système l'enrichissant en fonctionnalités. Ainsi l'importation de n'importe quel EV afin de l'enrichir fonctionnellement constitue le deuxième verrou d'ordre technologique. Le troisième verrou scientifique est lié à la conception d'un modèle opérationnalisable permettant de décrire les informations pédagogiques à fournir aux apprenants en EV et adaptées à l'apprentissage de gestes. Il est pour cela nécessaire de prendre en compte ce que l'enseignant souhaite mesurer (métriques), décrire ce qui est acceptable de ce qui ne l'est pas (*i.e.* les valeurs d'acceptabilité des métriques) et lui donner la possibilité de fournir une interprétation intelligible en EV de ce qui est analysé (retours visuels, auditifs, haptiques, etc. en fonction des valeurs d'acceptabilité). Nous proposons ainsi un modèle de *feedbacks pédagogiques*, permettant

de fournir via l'EVAH, des informations à l'apprenant préalablement définies par un expert, pour guider et évaluer l'apprenant lors de l'exécution de la tâche. Des paradigmes d'Interactions Humain-Machine (IHM) doivent être développés en conséquence afin de permettre à l'enseignant de générer les métriques, les feedbacks (visuels, audios ou haptiques) et leurs règles d'activation. En outre, les modèles et les IHM proposés doivent faciliter la réutilisation des EVAH existants tout en minimisant le processus de réingénierie.

1.2.2 Questions de recherche

Les trois questions de recherche auxquelles nous allons tenter d'apporter des réponses dans ces travaux sont listées ci-dessous.

En prenant en compte les besoins d'observation et d'analyse des enseignants ainsi que leurs pratiques pédagogiques :

- Quelles sont les méthodes permettant de créer des situations d'apprentissage décomposables et évaluables des gestes en EV ? (*Question 1*)
- Quels sont les modèles appropriés qui permettent l'analyse, l'évaluation et la restitution d'informations (feedbacks pédagogiques) en EV, ces informations aidant l'apprenant dans l'apprentissage et la réalisation des gestes ? (*Question 2*)
- Comment opérationnaliser ces éléments (méthodes de création d'une situation d'apprentissage, modèles de feedbacks pédagogiques) au sein d'un EV existant ? (*Question 3*)

1.2.3 Hypothèses de recherche

Notre démarche consiste à lever les verrous présentés en amont en apportant des réponses aux questions de recherche. Pour cela nous formulons les quatre hypothèses suivantes :

- la démonstration du geste à apprendre par l'enseignant et sa décomposition spatiale et temporelle en séquences, via le système MEVEL, permet d'atteindre les objectifs des enseignants en termes de construction d'une situation évaluable (*Hypothèse 1*) ;
- l'opérationnalisation d'un modèle descriptif de feedbacks pédagogiques à 4 dimensions « artefact virtuel d'intérêts, métrique d'évaluation, déclencheur, feedback multimodal » via le système GEFEEED permet aux enseignants d'atteindre leurs objectifs en termes de retour pédagogique en EV (*Hypothèse 2*) ;

- fournir des aides relatives à la décomposition spatiale et temporelle de la tâche à apprendre, via le système MEVEL a un impact positif sur l'apprentissage en termes de temps de réalisation de la tâche et de rétention des étapes et actions à suivre ainsi que leur séquencement (*Hypothèse 3*) ;
- fournir des feedbacks pédagogiques adaptés aux gestes, en EV, via le système GEFEED, améliore l'acquisition de compétences gestuelles (*Hypothèse 4*).

Les systèmes MEVEL et GEFEED sont introduits dans la section ci-dessous.

1.3 Aperçu des contributions

Dans l'optique d'apporter des éléments de réponse à l'ensemble des questions de recherche posées dans le cadre de ces travaux, nous avons proposé un premier système dénommé *Motion Evaluation in Virtual Environment for Learning* (MEVEL). MEVEL est un système opérationnalisant : (i) une méthode permettant la décomposition spatiale et temporelle de la tâche à apprendre et (ii) une méthode permettant l'extraction de mouvement d'intérêt (une partie du corps ou d'un objet manipulé). Grâce à MEVEL, les enseignants peuvent mettre en place une situation d'apprentissage décomposable et évaluable dédiée aux gestes dans un EVAH existant. Pour y parvenir, l'enseignant définit les différentes étapes de la tâche puis choisit, pour chaque étape, l'objet d'intérêt dont le mouvement sera analysé ou évalué. Ensuite, l'enseignant crée des points de contrôle (*CheckPoints*) (CP) délimitant spatialement le début, la fin et l'ensemble des actions de ce mouvement pour cette étape. À la suite de cela, l'enseignant peut enregistrer, extraire et rejouer les démonstrations des utilisateurs en EV. MEVEL permet d'obtenir quelques éléments pouvant servir à l'évaluation ou l'assistance dans l'activité des apprenants tels que le respect de la séquence d'actions, le jeu des mouvements effectués, le calcul de quelques propriétés (géométriques, cinématiques, etc.) ainsi que le temps des différentes séquences d'actions. En outre, nous avons proposé un modèle descriptif de feedbacks pédagogiques dédiés aux gestes. Ce modèle est opérationnalisé au sein d'un système dénommé *Gestural FEedback EDitor* (GEFEED) qui permet aux enseignants de fournir, selon leurs besoins d'observation et d'analyse, des aides (feedbacks) aux apprenants dans les EVAH existants. Ces feedbacks sont délivrés *via* des retours visuels (changer les couleurs des contours d'objets virtuels, affichés du texte dans l'EV), haptiques (faire vibrer des contrôleurs) ou auditifs (fournir des sons préalablement enregistrés ou générer automatiquement une voix à partir d'un texte). Ces aides sont déclenchées selon un ensemble de règles ou

conditions préalablement définies par l’enseignant via l’IHM de GEFEED. Pour enrichir les EVAH existant à l’aide des systèmes proposés, nous avons proposé une méthode permettant l’exportation et l’importation d’un EV une fois celui implémenté. Cette méthode repose sur un système d’indexation à mettre en place lors de l’exportation afin de corrélérer les scripts d’interaction aux « assets » ou « gameobjects » de la scène 3D, ce système étant réexploité à l’importation. En outre, une base de données externe à l’EV mémorise toutes les modifications réalisées en EV telles que les objets créés et les mouvements réalisés. Les EV enrichis fonctionnellement par les deux systèmes proposés (MEVEL et GEFEED) ainsi que leurs impacts sur l’apprentissage ont été évalués à l’aide de trois expérimentations impliquant des utilisateurs dans le rôle d’enseignants ou d’apprenants. La première expérimentation a été réalisée avec le système MEVEL afin d’évaluer son utilisabilité et son utilité du point de vue de l’enseignant (*Hypothèse 1*). Trois EV étaient proposés (c’est-à-dire, une simulation de fléchette, de billard et une simulation d’écriture) dans lesquels, l’enseignant devait définir la tâche à apprendre, la décomposer et réaliser une démonstration acceptable. La deuxième expérimentation est liée au système GEFEED et a permis à des enseignants de créer des feedbacks pédagogiques afin d’atteindre un ensemble d’objectifs pédagogiques prédéfinis ou non, au sein d’une simulation de dilution en microbiologie. De nouveau, l’utilité et l’utilisabilité du système ont été étudiées (*Hypothèse 2*). L’objectif de la troisième expérimentation est de mesurer l’impact sur l’apprentissage des aides et des feedbacks pédagogiques proposés par un EV enrichi par les systèmes MEVEL et GEFEED (*Hypothèses 3 et 4*). La simulation de dilution en microbiologie a de nouveau été considérée. L’ensemble de ces trois expérimentations nous a permis de confirmer partiellement 3 des quatre hypothèses de recherche et d’en infirmer une.

1.4 Organisation du manuscrit

Le chapitre suivant réalise un état de l’art sur plusieurs sujets liés à la conception et l’implémentation des EVAH dédiés à l’apprentissage de gestes. On y parle notamment des techniques utilisées pour la capture du mouvement humain et des objets manipulés, de ce qu’on entend par geste ainsi que leurs représentations et de l’impact des EVAH sur l’apprentissage dans plusieurs domaines. Le chapitre 3 présente un état de l’art, des études réalisées depuis 2010, sur les EVAH dédiés à l’apprentissage de gestes. Nous analysons dans ce chapitre les différentes méthodes et stratégies d’évaluation, les métriques impli-

quées dans ces évaluations, les feedbacks délivrés à l'utilisateur ainsi que la réingénierie de ces EVAH. Le chapitre 4 présente les contributions apportées au travers du système MEVEL (*Motion Evaluation in Virtual Environment for Learning*), développé pour la décomposition spatiale et temporelle de la tâche à apprendre puis l'extraction, le rejeu et l'étude des gestes dans les EVAH. Nous présentons dans ce chapitre un processus complet permettant de construire une situation d'apprentissage décomposable et évaluable dans ce contexte à partir de n'importe quel EVAH existant. Le chapitre 5 est dédié au système GEFEED (*GEsture FEedback EDitor*). À partir des métriques (liées aux temps, cinématiques, géométriques, etc.) évaluant l'activité de l'apprenant, les enseignants peuvent créer des feedbacks pédagogiques adaptés aux gestes et en fonction de leurs besoins d'observations et d'analyse. Le modèle descriptif des feedbacks pédagogiques, l'architecture du système et son IHM y sont décrits. Le chapitre 6 décrit une expérimentation qui nous a permis de mesurer l'impact d'un EV enrichi par les systèmes MEVEL et GEFEED conduite par deux hypothèses de recherche. Le dernier chapitre conclut ce manuscrit au travers d'une synthèse et des perspectives de recherche.

DEUXIÈME PARTIE

État de l'art

DU GESTE À SON EXPLOITATION DANS LES ENVIRONNEMENTS VIRTUELS POUR L'APPRENTISSAGE HUMAIN

La mise en place d'Environnements Virtuels pour l'Apprentissage Humain (EVAH) dédiés aux gestes nécessite l'étude de plusieurs sujets tels que : le geste, son apprentissage, les environnements virtuels, etc. Ce chapitre a pour objectif d'analyser l'existant afin d'identifier ou de définir pour chaque sujet considéré les principaux concepts qui seront exploités tout au long de ce manuscrit. Par conséquent, nous allons dans la première section, réaliser un tour d'horizon des différentes techniques de capture du mouvement, puis analyser ce que représente un geste à travers des définitions existantes, et examiner comment ce dernier peut être numérisé grâce à des méthodes de représentation. La deuxième section présentera plusieurs définitions de ce qu'est un Environnement Virtuel (EV) et tentera de montrer comment ces EV sont utilisés dans diverses situations d'apprentissage humain en général et dans le cadre de l'apprentissage du geste en particulier.

2.1 Gestes et Mouvements

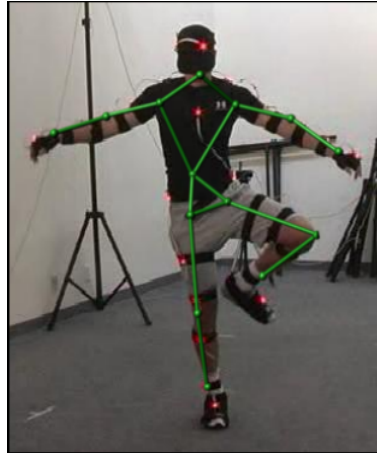
De nombreux EV ont été conçus afin de simuler des situations d'apprentissage très variées telles que l'apprentissage du violon (NG *et al.*, 2007), la rééducation des mouvements de la tête et du cou (MIHAJLOVIC *et al.*, 2018), les activités sportives impliquant des balles (MILES *et al.*, 2012), la poterie (CHIANG *et al.*, 2018), etc. Ce phénomène est dû à plusieurs facteurs, en particulier, on peut noter la démocratisation des techniques de capture du mouvement. Ainsi cette section réalise un état de l'art de ces techniques, puis décrit ce qu'est un geste pour ensuite analyser les méthodes et modèles permettant d'obtenir une représentation numérique de ce dernier.

2.1.1 Techniques de capture du mouvement

Nous pouvons regrouper les méthodes permettant la capture de mouvements en plusieurs catégories selon le support matériel utilisé, ainsi que l'objet ou la partie du corps qui peut être capturée. Ces systèmes peuvent s'appuyer sur des caméras, des capteurs inertiels, magnétiques, des systèmes mécaniques ainsi que sur des dispositifs haptiques. Plusieurs travaux extraient le mouvement à partir de différents types de caméras (*e.g.* simple, infrarouge ou fournissant des vidéos stéréoscopiques, avec des capteurs de profondeur). L'extraction se fait principalement avec des techniques d'inférence à partir des pixels des vidéos obtenues (SARAFIANOS *et al.*, 2016). Cependant, les vidéos stéréoscopiques permettent d'obtenir des points de vue différents de l'espace et faciliter ainsi le suivi de points spécifiques du corps. Ceci permet, par exemple, de reconstituer un squelette 3D (LIU *et al.*, 2016). De plus, associées à des capteurs de profondeur, les caméras fournissent à la fois une image en couleur et une estimation de la profondeur pour chaque pixel (HUANG *et al.*, 2011). Les caméras infrarouges sont utilisées pour trianguler l'emplacement de marqueurs optiques attachés au sujet ciblé (MENOLOTTO *et al.*, 2020).



(a)



(b)

FIGURE 2.1 – (a) marqueurs passifs (FURTADO *et al.*, 2013) (b) marqueurs actifs (KIRK *et al.*, 2005)

On distingue deux types de marqueurs optiques, les passifs (*cf.* figure 2.1 (a)) et les actifs (*cf.* figure 2.1 (b)). Les marqueurs optiques passifs (*c.-à-d.* réfléchissants) sont recouverts d'un matériau rétro-réfléchissant pour renvoyer la lumière infrarouge qui est générée près de l'objectif de la caméra. Les marqueurs optiques actifs émettent leur propre lumière ou des séquences de lumière. Ils produisent ainsi un contraste élevé dans les images et four-

nissent un signal bien plus robuste que les marqueurs optiques passifs (MOESLUND *et al.*, 2001). Les caméras offrent l'avantage d'avoir un encombrement faible lié aux marqueurs posés sur le corps. Ces marqueurs peuvent de plus être posés sur les objets afin de suivre leurs mouvements. Cependant, les méthodes utilisant les caméras souffrent du problème d'occlusion. Des techniques utilisent simultanément plusieurs caméras dans l'optique de réutiliser les différentes images produites afin de compenser, voire supprimer les données occultées (BALLAN *et al.*, 2012 ; REGAZZONI *et al.*, 2014).

Les systèmes inertiels sont basés sur des gyroscopes, des magnétomètres et des accéléromètres pour mesurer respectivement la position angulaire, la force et la direction du champ magnétique ainsi que l'accélération linéaire. Ces capteurs permettent de déduire la position et l'orientation relatives dans le temps de la partie du corps ou des objets manipulés auxquels ils sont rattachés. Cependant, les systèmes inertiels souffrent du problème de la dérive, c'est-à-dire que les données renvoyées peuvent être erronées par rapport aux changements réels de position et d'orientation. Ceci est dû à l'intégration des accélérations (les angles étant la dérivée des vitesses elles-mêmes étant la dérivée des accélérations) et la fusion des capteurs (SUN *et al.*, 2010). La correction de ces erreurs nécessite généralement l'utilisation de capteurs (GPS par exemple) supplémentaires (BEVLY, 2004). SUN *et al.* (2010) tentent de corriger les erreurs dues à la dérive en utilisant un filtre de Kalman complémentaire. Le filtre fusionne les données des capteurs de différentes sources de manière adaptative en fonction de leur confiance, ce qui permet de réduire les interférences induites par l'accélération du corps et la perturbation magnétique.

Les systèmes magnétiques utilisent des capteurs placés sur le corps capable de mesurer un champ magnétique basse fréquence généré par une source émettrice. Ces capteurs fournissent en sorties des positions 3D et des informations sur la rotation. Par exemple, KIKUKAWA *et al.* (2014) utilisent un système de capteurs magnétiques "LIBERTY" pour capturer la position et l'orientation d'un instrument de musique lors d'une activité d'apprentissage dudit instrument. L'avantage de ces systèmes est qu'on peut obtenir des résultats utiles, en temps réel à partir de 6 capteurs. Malheureusement, ces capteurs sont sensibles aux interférences magnétiques et électriques des objets métalliques présents dans l'environnement. De plus, le câblage des capteurs a tendance à limiter les mouvements des utilisateurs.

Les systèmes mécaniques utilisent des exosquelettes, c'est-à-dire des structures mécaniques qu'on attache au corps. Chaque articulation est alors reliée à un encodeur angulaire. La valeur du mouvement de chaque encodeur (rotation) est enregistrée par un ordinateur

qui, en connaissant la position relative des encodeurs (articulations), peut reconstruire ces mouvements. Cette technique fournit des informations réelles sans occlusion. Cependant, la combinaison exosquelette peut être lourde et encombrante, limitant la liberté de mouvement de l'utilisateur (NOGUEIRA, 2011).

La méthode basée sur l'utilisation de caméras et de marqueurs optiques peut être utilisée pour la capture du mouvement des objets manipulés (FURTADO *et al.*, 2019). Cette méthode souffre néanmoins du problème lié au phénomène d'occlusion. Les dispositifs haptiques sont aussi utilisés pour la capture du mouvement d'objets manipulés (*cf.* figure 2.2).



FIGURE 2.2 – Exemple de dispositif haptique : *Geomatic Touch*. Il permet de capturer les coordonnées (x, y, z) et la direction du stylet. De plus, il peut générer une force s'opposant à la main de l'utilisateur, permettant la simulation du toucher et des interactions avec des objets virtuels. (MIKI *et al.*, 2016)

Cependant, contrairement aux méthodes basées sur les caméras, les interfaces haptiques permettent une manipulation plus aisée d'objet à travers un retour sensitif au niveau du toucher lors de la manipulation (ALUR *et al.*, 2014). Certains dispositifs haptiques (*ex.* bras à retours d'efforts) disposent souvent d'un espace de travail limité, ce qui peut contraindre l'utilisateur dans ses mouvements à cet espace.

Chacune des techniques susmentionnées a ses avantages et ses inconvénients. Les techniques de capture du mouvement basées sur des caméras souffrent du phénomène d'occlusion tandis que celles utilisant les capteurs inertiels souffrent du problème de la dérive. Les méthodes utilisant des capteurs magnétiques sont, pour leur part, sensibles aux interférences magnétiques et électriques. Cependant, ces trois techniques peuvent être utilisées

pour la capture des mouvements humains et des objets manipulés en utilisant des méthodes permettant de compenser leurs défauts respectifs. Les systèmes mécaniques portatifs sont souvent lourds et peuvent limiter les mouvements des apprenants. Ces systèmes ne sont pas conçus pour capturer les mouvements des objets manipulés, mais sont néanmoins utilisés dans différentes situations d'apprentissage. Les interfaces haptiques quant à elles permettent aux utilisateurs de percevoir des sensations plus proches de la réalité. Ces interfaces peuvent capturer les mouvements des objets manipulés et quelques fois de certaines parties du corps humain. L'ensemble de ces moyens ont permis la démocratisation de la capture du mouvement dans plusieurs domaines professionnels, en particulier dans le contexte de l'utilisation d'EV pour l'apprentissage de gestes (LIU *et al.*, 2020b; FITZGERALD *et al.*, 2007). Ces techniques ont mené à de nouvelles interactions avancées, dont celles liées aux gestes. Il est devenu possible de capturer et analyser les mouvements réalisés par le corps humain et les objets manipulés en EV à des fins d'apprentissage humain. Ce constat nous a amenés à considérer les EV comme des outils accessibles pour apprendre des gestes professionnels. Certaines des techniques présentées ne permettent pas de capturer les mouvements des objets manipulés ou du corps humain, mais sont utilisées dans des situations d'apprentissages diverses et variées. Notre objectif dans cette thèse est de fournir aux enseignants des méthodes et outils pour la mise en place de situations évaluables dédiées à l'apprentissage de gestes dans les EV, indépendamment du matériel de capture de mouvements utilisé. Il faut noter que bien qu'on puisse capturer les mouvements des parties du corps et des objets manipulés dans les EV, leur traitement nécessite de savoir et comprendre ce qu'est un geste et comment le représenter numériquement. De plus, la notion de geste reste distincte de celle du mouvement. Ainsi, dans la suite de cette section, nous nous intéressons plus précisément à ce qu'est un geste, un mouvement et à sa représentation informatique.

2.1.2 Définitions : geste et mouvement

L'objectif de cette partie est de faire une revue des définitions du geste et du mouvement afin d'analyser ces deux concepts, de les différencier et de définir ce qui va être observé, analysé et interprété dans le cadre de notre travail de recherche. Plusieurs définitions du mouvement et du geste sont proposées par le dictionnaire Larousse¹. L'une de ces définitions indique que le mouvement correspond à « *l'action de se mouvoir, de*

1. <http://www.larousse.fr>

changer de place, de modifier la position d'une partie du corps ». Tandis que le geste peut être défini comme étant « *la manière de mouvoir le corps, les membres et, en particulier, la manière de mouvoir les mains dans un but de préhension, de manipulation* ». Ces deux définitions montrent que le geste a nécessairement un objectif ou une finalité, ce qui n'est pas forcément le cas du mouvement. Le mouvement est souvent associé aux propriétés physiques caractérisant un corps qui évolue dans le temps et l'espace, le geste, quant à lui, attribue au mouvement une sémantique. Cette différence est particulièrement marquée en langue des signes, par exemple, « les gestèmes » qui « sont des unités de mouvement porteuses ou non de sens », caractérisés notamment par « l'emplacement des signes, la posture et le mouvement des mains ainsi que leur orientation » (GIBET *et al.*, 2007). Ce constat est confirmé par la définition de LEPLAT (2013) qui indique que : « *Un geste est un mouvement humain auquel est attribuée une signification. En ce sens, on pourrait dire que le geste n'est pas observable ; ce qui l'est, c'est le mouvement auquel est attribuée la signification, c'est l'action dans laquelle il s'insère qui donne (ou non) au mouvement la qualité de geste.* » cité par ANNE-CATHERINE OUDART (2017). Les travaux de VADCARD (2019) considèrent que le geste a un caractère moteur (le mouvement), fonctionnel (lié à l'objectif de l'action) et structurant (lié aux connaissances du sujet et au contexte d'apprentissage). En outre, dans le contexte de l'apprentissage, « *un geste dit efficace repose sur un ensemble de connaissances qui permettent à l'apprenant de discriminer, identifier, traiter l'information relative au but à atteindre, aux propriétés de la matière à manipuler et des instruments disponibles pour réaliser le geste, aux moyens dont dispose la personne pour contrôler les effets de ses actions, etc* » (VADCARD, 2019).

Dans notre étude, nous nous intéressons notamment au caractère moteur du geste, c'est-à-dire aux mouvements sous-jacents aux gestes (*i.e.* positions et orientations dans le temps des parties du corps ou de l'objet manipulé). Ainsi, les critères géométriques, dynamiques et cinématiques de ces gestes peuvent être extraits afin de fournir des informations en temps réel aux apprenants en vue d'améliorer leur apprentissage. Avant tout, il faut noter que le traitement du mouvement dans les EV requiert une représentation informatique de ce dernier. De ce fait, la section suivante présente diverses méthodes issues de la littérature permettant la représentation du mouvement.

2.1.3 Représentations du mouvement

Dans le cadre de nos travaux portant sur l'apprentissage de gestes dans les EV, il nous faut capturer puis représenter les mouvements associés à ces gestes à partir de modèles

afin de pouvoir les analyser. Ainsi, nous nous intéressons aux modèles de représentation et de description des mouvements, afin de les coder numériquement. Un mouvement est ici considéré comme étant le mouvement de tout ou partie du corps ou d'objets manipulés. Un mouvement est ici considéré comme étant le mouvement de tout ou partie du corps ou d'un objet manipulé. De nombreuses notations existent pour représenter les mouvements du corps humain (ABE *et al.*, 2017). À titre d'exemple, nous présentons ici la notation de *Laban*. Elle permet de transcrire l'espace, le temps et le rythme du mouvement du corps humain dans le cadre de la danse, à la manière d'une partition de musique (LABAN *et al.*, 1971 ; LOKE *et al.*, 2005).

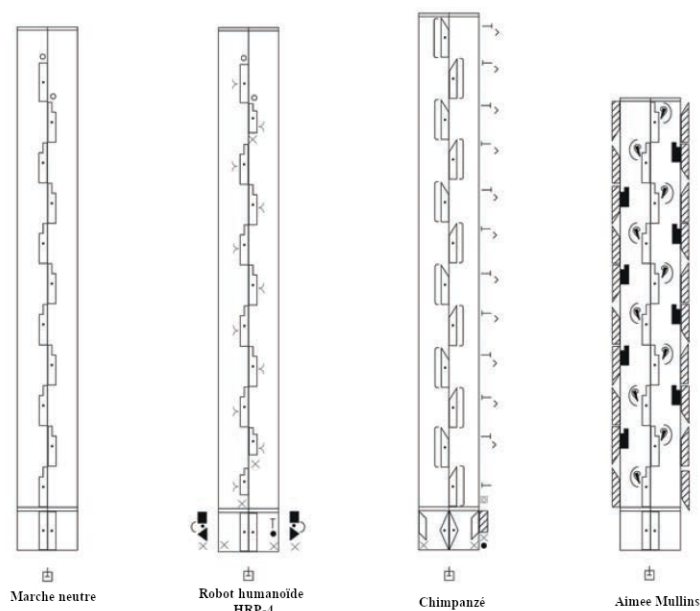


FIGURE 2.3 – Exemple de la notation du mouvement de *Laban*, de gauche à droite : marche neutre, robot humanoïde HRP-4, Chimpanzé, Aimee Mullins - mannequin et athlète amputé sous les genoux (ABE, 2016)

Les réponses à un ensemble de questions permettent de noter le mouvement, il s'agit de savoir (i) quel corps ou partie du corps humain veut-on décrire le mouvement ? (ii) vers quelle direction la partie du corps ou le corps en entier se dirige-t-il ? (iii) quand le mouvement étudié commence-t-il ? (iv) combien de temps dure le mouvement étudié ? La notation *Laban* produit un *cinétogramme* qui se lit du bas vers le haut et est composée d'une portée (composée de trois lignes verticales) et des signes de direction qui indiquent l'ensemble du mouvement d'un individu (ABE, 2016). Chaque colonne de la portée correspond aux parties du corps, et on y place des signes de direction. La figure 2.3 présente des

exemples décrivant différentes marches (marche neutre, robot humanoïde HRP-43, chimpanzé et Aimee Mullins, mannequin et athlète amputé sous les genoux). Il existe d'autres notations comme celle de *Benesh*, *Comté*, *Eshkol-Wachman*, etc JEANNE (2017). Ces notations ne se font pas exclusivement à la manière d'une partition musicale, par exemple, la notation de *Eshkol-Wachman* s'écrit à l'horizontale sur une grille. Même lorsque la notation se fait à la manière d'une partition musicale, certaines notations ajoutent des détails qu'on ne retrouve pas nécessairement dans les autres. Par exemple, la notation de *Comté* utilise le solfège traditionnel et ajoute des informations sur les directions des pas. Des descriptions détaillées de ces notations sont présentées dans JEANNE (2017). Bien que les notations existantes soient fréquemment utilisées pour représenter le mouvement, elles se limitent pour la plupart à la représentation du mouvement humain. De nos jours, l'une des méthodes les plus utilisées pour représenter le mouvement humain consiste à utiliser des graphes (constitués de nœuds et de segments), afin de modéliser les mouvements.

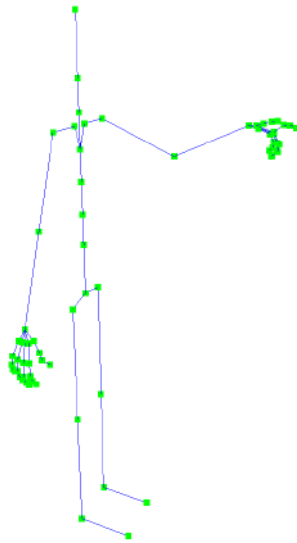


FIGURE 2.4 – Exemple de squelette humain 3D représenté sous la forme d'un graphe (COULAND, 2020)

Selon (COULAND, 2020), « ces mouvements sont représentés sous la forme d'une succession de squelettes 3D, c'est-à-dire des postures espacées selon un pas de temps fixe ou variable où chaque nœud (*cf.* figure 2.4, couleur verte) contient généralement plusieurs informations (le nom, la position ou l'orientation de l'articulation, ainsi que des références vers les articulations parentes et filles) ». Nonobstant le fait que cette structure soit particulièrement adaptée pour représenter le mouvement humain, elle n'a pas

été conçue pour la représentation du mouvement d'objets manipulés. Selon FUCHS *et al.* (2006) (cité par JEANNE, 2017), le mouvement humain peut aussi être décrit selon les propriétés mécaniques du corps ou selon les articulations et segments déplacés. Cette analyse biomécanique de l'organisme est réalisée à l'aide de méthodes cinématiques (*i.e.* mesure des déplacements, vitesses et accélérations des segments du corps) et dynamiques (*i.e.* mesure des forces et moments générés par la posture et le mouvement du corps). La cinématique directe correspond à la description et au positionnement de chaque articulation afin d'obtenir la posture souhaitée ou la configuration des articulations/effecteurs terminaux. Tandis que la cinématique inverse consiste à déduire de la posture désirée ou de la configuration des articulations/effecteurs terminaux, la configuration correspondante des articulations. La dynamique directe est le calcul des accélérations produites par les efforts et la dynamique inverse est le calcul des efforts lorsque l'on connaît le mouvement (JEANNE, 2017). Cette technique a été utilisée dans BOGERT *et al.* (2013) pour analyser le rôle des membres inférieurs pendant la marche chez 12 sujets valides. Néanmoins, elle peut entraîner une perte d'informations sur certaines étapes/sous-étapes du mouvement à représenter.

Dans ces travaux de recherche, nous décrivons le mouvement comme étant un ensemble de propriétés géométriques, dont les valeurs varient dans le temps. Ainsi, un objet ou une partie du corps en mouvement correspond à un ensemble fini dont chaque élément représente les informations de position et/ou d'orientation que l'objet ou la partie du corps occupe dans l'espace à un moment donné. Elle permet de représenter les mouvements de tout ou parties du corps humain et des objets manipulés (excepté la méthode utilisant les propriétés mécaniques). Elle permet aussi aux apprenants de rejouer les mouvements des experts. Dans cette partie, nous avons : (i) exploré plusieurs techniques permettant de capturer le mouvement (ii), analysé des définitions du geste et du mouvement et (iii) présenté des modèles et méthodes permettant de représenter numériquement les mouvements. Certains des systèmes de capture du mouvement peuvent capturer les mouvements des humains et des objets manipulés tandis que d'autres non. De plus, selon la représentation du mouvement considéré, on peut récolter des informations diverses et variées sur les gestes réalisés. Dans ce contexte, il est nécessaire d'étudier les pratiques existantes dans les EV dédiés à l'apprentissage de gestes en termes d'utilisation et d'exploitation des données sur l'activité des apprenants.

2.2 Environnements virtuels dédiés à l'apprentissage de gestes

Dans cette section, nous allons rappeler les grands principes de la RV, puis étudier : (i) les EV dédiés à l'apprentissage et (ii) les EV dédiés à l'apprentissage du geste. Quelques exemples représentatifs sont présentés pour mettre en évidence les objectifs de chaque catégorie d'EV. Ces objectifs nous permettront d'identifier les propriétés communes aux EVAH dédiés aux gestes et exclusifs par rapport aux EVAH dont le geste n'est pas l'objet d'étude. Nous analysons par la suite ces propriétés à travers une étude bibliographique.

2.2.1 Les environnements virtuels immersifs et la boucle d'interaction

Les Environnements Virtuels immersifs sont définis par ELLIS (1994) comme « un système permettant d'afficher des images virtuelles interactives améliorées par des modalités d'affichage non visuelles telles que les modalités auditives et haptiques, pour donner la sensation aux utilisateurs qu'ils sont immergés dans un espace synthétique ou artificiel ». Pour HACHET (2003), l'EV est représenté par un modèle 3D de données réelles ou imaginaires qu'on peut visualiser et avec lesquels on peut interagir en temps réel. Le principe fondamental de la RV proposé par FUCHS *et al.* (2006) (*cf.* figure 2.5) repose sur une boucle sensori-motrice d'interaction continue entre le système informatique générant des retours sensoriels perçus par l'utilisateur d'une part, et l'utilisateur interagissant ou influant sur le système *via* des interfaces motrices. Plus précisément, ce principe stipule que : « *l'utilisateur agit sur l'environnement virtuel grâce à l'usage d'interfaces motrices qui captent ses actions (gestes, déplacements, voix, etc.). Ces activités sont ainsi transmises au calculateur qui l'interprète comme une demande de modification de l'environnement. Conformément à cette sollicitation de modification, le calculateur évalue les transformations à apporter à l'environnement virtuel et les restitutions sensorielles (images, son, efforts, etc.) à transmettre aux interfaces sensorielles.* » (FUCHS *et al.*, 2006).

Bon nombre de travaux en RV tentent ainsi d'améliorer l'immersion et la présence des utilisateurs au sein des EV, en améliorant notamment les interactions et le réalisme du monde virtuel (ZÉNOUDA, 2012). Selon WITMER *et al.* (1998), « Un EV qui produit un plus grand sentiment d'immersion produira des niveaux de présence plus élevés ». Pour OUTAOUAIS (2022), l'immersion est reliée à la technologie utilisée permettant de fournir

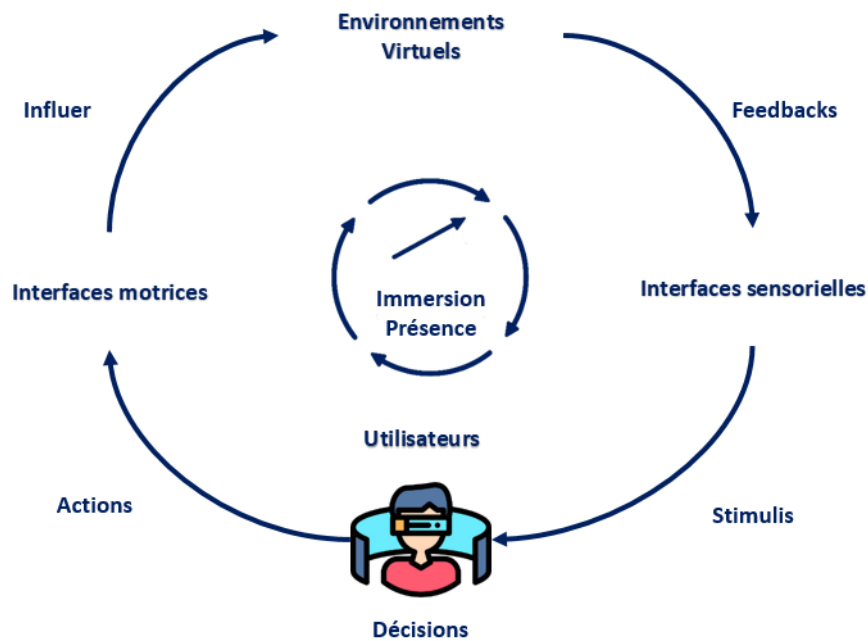


FIGURE 2.5 – La boucle « perception, cognition, action » des environnements virtuels

un « *input* » sensoriel multimodal à l'utilisateur (BYSTROM *et al.*, 1999 ; DRAPER *et al.*, 1998 ; SLATER *et al.*, 1997). L'immersion est définie par SLATER *et al.* (1997) comme étant la mesure à laquelle un système informatique est capable d'offrir des illusions de la réalité étant à la fois : (1) inclusives, (2) vastes, (3) environnantes et (4) vives. Selon eux, l'inclusion survient dans la mesure où la réalité physique est coupée complètement (OUTAOUAIS, 2022). Sur le plan visuel, les EV peuvent immerger les utilisateurs totalement (*via* les casques de RV notamment), partiellement (*via* le système CAVE *Cave Automatic Virtual Environments* par exemple) (CRUZ-NEIRA *et al.*, 1993) ou ne pas les immerger (EV de type *desktop*/bureau). La présence est définie par OUTAOUAIS (2022), comme étant la perception psychologique d'être « là » c'est-à-dire à l'intérieur de l'EV. Il semble que les chercheurs s'entendent sur cette définition bien que chacun ajoute des nuances à celle-ci (STRAATEN *et al.*, 2000). L'interaction est possible à l'aide de techniques permettant aux utilisateurs d'interagir avec l'EV *via* des interfaces motrices. BOWMAN (1999) distingue 4 techniques d'interaction qui sont respectivement : la navigation, la sélection d'objets, leurs manipulations ainsi que le contrôle d'application. La navigation correspond à la capacité de l'utilisateur à se déplacer dans l'EV. Dans ce contexte, BOLETSIS (2017) a réalisé une revue de la littérature sur les différentes méthodes de navigation en EV. Leurs résultats ont permis d'identifier quatre types de moyens de navigation (basée sur la téléportation,

sur le mouvement, à l'échelle de la pièce, à l'aide de contrôleurs) en RV. La navigation basée sur le mouvement utilise un certain type de mouvements physiques pour permettre l'interaction telle que, par exemple, la marche sur place. La navigation à l'échelle de la pièce est similaire à la navigation basée sur le mouvement, excepté le fait que l'interaction a lieu dans des EV dont la taille est souvent limitée par celle de l'environnement réel. Dans la navigation à l'aide de contrôleurs, les utilisateurs utilisent des dispositifs matériels pour se déplacer dans l'EV. La téléportation est une interaction réalisée à partir de mouvements non continus qui permet de déplacer instantanément, dans l'espace, la vue de l'utilisateur (BOLETSIS, 2017). La sélection et la manipulation permettent aux utilisateurs respectivement de choisir et modifier les propriétés des objets virtuels présents dans l'EV. Le contrôle de l'application permet aux utilisateurs de changer des paramètres (*e.g.* changement de mode, envoi de commandes) de l'EV généralement par des menus 2D ou 3D (GROSJEAN *et al.*, 2001). La RV a pour objectif de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensori-motrice et cognitive dans un EV qui peut être imaginaire, symbolique ou simulant certains aspects du monde réel (FUCHS *et al.*, 2006). En ce sens, les travaux en RV tentent en général d'améliorer l'immersion et la présence. Cependant, les EV dédiés à l'apprentissage humain ont pour objectif d'améliorer l'apprentissage en favorisant, par exemple, la motivation, l'engagement, l'acquisition de compétence, la rétention d'informations, etc. Nous analysons quelques exemples d'EV dédiés à l'apprentissage dans la section suivante.

2.2.2 Environnements virtuels dédiés à l'apprentissage humain : les EVAH

Un Environnement Virtuel pour l'Apprentissage Humain (EVAH) est un EV dont le but est d'influer positivement sur l'apprentissage humain (CHEVAILLIER, 2006). Un EVAH peut être considéré comme un type particulier d'Environnement Informatique pour l'Apprentissage Humain (EIAH). Un EIAH est défini par TCHOUNIKINE (2002) comme étant : « *un environnement informatique conçu dans le but de favoriser l'apprentissage humain, c'est-à-dire la construction de connaissances chez un apprenant. Ce type d'environnement mobilise des agents humains (élève, enseignant, tuteur) et artificiels (agents informatiques, qui peuvent eux aussi tenir différents rôles) et leur offre des situations d'interaction, localement ou à travers les réseaux informatiques, ainsi que des conditions d'accès à des ressources formatives (humaines et/ou médiatisées).* ». Pour CORMIER (2012),

un EVAH est « *un sous-ensemble des EIAH qui utilisent les technologies de la Réalité Virtuelle (RV)* ».

À titre d'exemple, dans le domaine de la santé, MAYNE *et al.* (2020) ont conçu un EVAH dédié à la résolution d'une scène de crime correspondant à un scénario pédagogique opérationnalisé par un enseignement en médecine légale. Une expérimentation a été réalisée et leurs résultats montrent que cet EVAH soutient l'acquisition des compétences pratiques liées aux traitements de ces scènes tout en offrant une expérience pratique rentable, la possibilité de travailler en autonomie et dans une variété de scénarios différents (MAYNE *et al.*, 2020). Durant la pandémie de la *COVID-19*, DE PONTI *et al.* (2020) ont évalué l'EVAH *Body interactTM*. Cet EVAH fournit aux apprenants des patients virtuels permettant d'apprendre à effectuer un examen physique du thorax, de l'abdomen, des pouls périphériques, etc. Parmi les feedbacks fournis, on peut noter, les séquences détaillées des actions entreprises par chaque apprenant pendant la simulation et des métriques de performance produites par le système. Ces deux informations sont mises à la disposition des enseignants pour l'évaluation des participants. De plus, l'EVAH a permis d'éviter l'interruption de la formation des étudiants pendant les périodes de confinement et la majorité des participants ont donné une réponse positive sur la qualité perçue de cette formation utilisant l'EV. Cependant, pendant cette période, une proportion non négligeable d'étudiants ont rencontré des difficultés pour accéder en ligne à l'EVAH (DE PONTI *et al.*, 2020).

Dans le domaine de l'éducation, EBERT *et al.* (2016) proposent un EVAH permettant de favoriser l'acquisition de la langue suédoise. À travers une expérimentation impliquant 20 étudiants, les auteurs ont montré que cet EVAH permet d'améliorer la rétention des connaissances et est efficace pour l'apprentissage. L'immersion dans un pays constitué des natifs de la langue est souvent considérée comme le moyen le plus efficace pour apprendre cette langue et pour progresser, mais il n'est pas toujours possible de s'installer dans un nouvel endroit. La RV tente de résoudre ce problème en offrant, à travers un EVAH, la possibilité d'immerger l'apprenant dans un environnement virtuel réaliste pour l'apprentissage de cette langue (EBERT *et al.*, 2016). LIKITWEERAWONG *et al.* (2018) ont conçu un EVAH pour l'apprentissage de la conduite automobile. L'EVAH fournit aux apprenants des feedbacks tels que les tracés de la route avec différents niveaux de couleurs représentant la qualité de la conduite et des zones représentant les portions de route moins maîtrisées par l'apprenant où ils doivent encore progresser. Une expérimentation avec 100 apprenants a montré que cet EVAH favorise l'engagement des utilisateurs à se former et

l'acquisition des compétences de base et des connaissances en matière de conduite.

Dans le sport, LIU *et al.* (2020a) ont développé un EVAH qui peut être utilisé pour synthétiser des exercices basés sur l'utilisation d'une raquette. Une première étude a été réalisée afin d'évaluer l'utilité de l'EVAH comme outil d'entraînement en comparant les différences d'intensité des exercices selon trois niveaux (faible, moyen et élevé) aux fréquences cardiaques des apprenants. Une deuxième étude a été menée afin d'examiner l'amélioration des performances des participants sous trois conditions (pas d'entraînement, entraînement en EV et entraînement dans le monde réel). Les résultats indiquent que l'EVAH développé peut être utilisé efficacement comme outil d'exercice et d'entraînement. De plus, grâce à la possibilité de définir des métriques liées au contexte des sports utilisant une raquette (*ex.* distance, vitesse, fréquence, etc.) les utilisateurs peuvent facilement ajuster les objectifs et les niveaux d'intensité des exercices réalisés (LIU *et al.*, 2020a).



FIGURE 2.6 – Un EVAH collaboratif dans le domaine des urgences paramédicales. En haut à gauche : un utilisateur mesure la pression artérielle ; en haut à droite : deux utilisateurs échangent des outils dans une situation de coopération ; en bas à gauche : la découpe des vêtements du patient est effectuée à l'aide d'une interface graphique montrant le délai utilisé pour réaliser la tâche en temps réel ; en bas à droite : la vue du formateur permet de modifier les symptômes du patient en temps réel (SCHILD *et al.*, 2018)

Les EVAH permettent aussi d'apprendre de manière collaborative. SCHILD *et al.* (2018) ont développé un EVAH simulant une urgence paramédicale (*cf.* figure 2.6) et plus précisément sur le choc anaphylactique, un type de scénario pédagogique représentatif des cas médicaux critiques qui sont trop rares sur le terrain pour être étudiés dans le cadre

d'un cursus normal de formation professionnelle. La réalisation d'une expérimentation a permis de démontrer que l'EVAH peut soutenir la formation professionnelle en permettant aux apprenants d'acquérir des connaissances et travailler en équipe. Plusieurs études ont analysé l'apport de la RV sur l'apprentissage. Par exemple, HUANG *et al.* (2019) utilisent la théorie de l'autodétermination pour comprendre comment les EVAH satisfont ou entravent l'autonomie, l'acquisition de compétence et, par conséquent, favorisent ou compromettent un engagement durable des apprenants. La théorie de l'autodétermination est une théorie qui s'appuie sur le concept de la motivation et vise à décrire les "besoins" internes des apprenants qui peuvent affecter leurs expériences et leurs performances dans une situation donnée (RYAN *et al.*, 2000). Les résultats des expérimentations de HUANG *et al.* (2019) démontrent que les EVAH ont un effet positif sur la motivation et l'engagement des apprenants.

De façon générale, les EVAH facilitent la mise en œuvre (moins de contraintes logistiques et matérielles) de situations d'apprentissage. Ils permettent davantage de personnalisation, des scénarios plus riches et modulaires, automatisent certaines tâches de l'enseignant (par exemple, l'évaluation grâce aux métriques relevées par le système), offrent la possibilité de travailler en autonomie pour l'apprenant, etc. De plus, la plupart des exemples présentés ci-dessus montrent que les EVAH peuvent soutenir l'apprentissage humain en favorisant la motivation, l'engagement, la rétention d'informations, l'acquisition de compétences, etc. Ils peuvent être utilisés efficacement comme un outil d'exercice et d'entraînement bien qu'ils n'aient pas vocation à remplacer les situations d'apprentissage en environnement réel. Les EVAH tentent d'atteindre ces objectifs à travers des scénarios pédagogiques adaptés aux compétences à acquérir et aux besoins d'observations et d'analyse des enseignants et des apprenants. Comparés aux autres EVAH, les EVAH dédiés aux gestes ont, généralement, pour objectif spécifique de favoriser l'acquisition de compétences motrices en réalisant des analyses sur les gestes produits et en fournissant des feedbacks afin de guider et aider les apprenants dans leur exécution. Ainsi, dans la section suivante, nous analysons plus précisément quelques spécificités de ce type d'EVAH.

2.2.3 Les EVAH dédiés à l'apprentissage de gestes

Plusieurs travaux de recherche s'intéressent à l'utilisation d'EVAH pour l'apprentissage de gestes dans divers domaines (NGUYEN *et al.*, 2010 ; CHEN *et al.*, 2019 ; KIRAKOSIAN *et al.*, 2019 ; VAUGHAN *et al.*, 2019). SCHMIDT *et al.* (2011) (cité dans LEVAC *et al.* (2014)) définissent l'apprentissage de gestes comme « *un ensemble de processus internes associés*

à la pratique ou l'expérience conduisant à des changements relativement permanents dans l'acquisition d'une compétence motrice ». Par exemple, dans un contexte industriel, JIANG *et al.* (2016) ont proposé un EVAH permettant d'améliorer la formation à l'assemblage de pièces, en mettant l'accent sur le réalisme de la simulation à l'aide de retours haptiques et la fidélité visuelle des modèles 3D conçus. Les auteurs ont généré des séquences de montage en identifiant, au cours du processus de démontage, la contrainte d'assemblage de chaque pièce. Ainsi, ces séquences de montage servent de base d'apprentissage aux apprenants notamment grâce à la capacité de rejeu de ces séquences. Une expérience préliminaire a révélé qu'il n'y avait aucune différence significative entre les groupes utilisant l'EVAH et le groupe utilisant des méthodes traditionnelles. Ce qui indique que dans le cadre de l'apprentissage de séquences d'assemblage, l'apprentissage à l'aide d'EVAH peut remplacer la formation traditionnelle dans une certaine mesure.

Nous définissons les EVAH dédiés aux gestes comme étant des EVAH conçus pour favoriser l'apprentissage ou l'amélioration des compétences motrices *via* une boucle d'interaction continue dont les feedbacks sont dédiés : (i) à l'évaluation de la tâche basée « geste » et des compétences sous-jacentes à sa réalisation (ii), à l'évaluation de la progression dans cette tâche ou (iii), au guidage de l'utilisateur dans la bonne exécution de la tâche. Ces feedbacks sont généralement issus de métriques fondées sur des données géométriques, cinématiques, dynamiques et/ou séquentielles des gestes réalisés (LARBOULETTE *et al.*, 2015) ou leurs conséquences en termes de mouvements, sur les objets virtuels de la scène. Par exemple, la figure 2.7 présente, à gauche, un utilisateur totalement immergé dans un EVAH *via* un casque de RV et à droite, l'EV dans lequel il est immergé afin d'apprendre à jongler avec des balles et les gestes de la main. Les apprenants reçoivent des feedbacks sur la trajectoire des balles manipulés (ADOLF *et al.*, 2019).

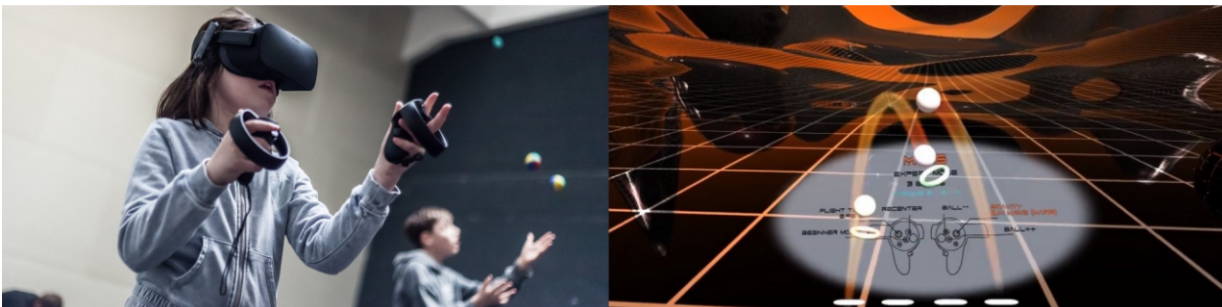


FIGURE 2.7 – Une personne jonglant en RV (à gauche). Application de jonglage en RV (à droite) (ADOLF *et al.*, 2019)

En vue d'étudier la motivation dans le processus d'apprentissage chez les apprenants, les auteurs ont réalisé une expérimentation avec deux groupes utilisant respectivement l'EVAH conçu et des vidéos. Leurs résultats montrent que le groupe en RV obtient de meilleurs scores en ce qui concerne la motivation et l'engagement. HIROAKI *et al.* (2011) proposent dans le cadre de l'apprentissage de la calligraphie japonaise une fonction permettant de corriger efficacement l'écart entre les mouvements de l'instructeur et ceux de l'apprenant, en générant une force d'attraction qui réoriente en temps réel les gestes des apprenants. Les résultats de leur expérimentation, impliquant 18 participants, indiquent que la fonction proposée permet d'améliorer l'acquisition de compétences motrices. Dans le domaine médical, VAUGHAN *et al.* (2020) ont proposé un EVAH pour l'apprentissage d'une anesthésie péridurale (*cf.* figure 2.8). Ils utilisent des enregistrements de données détaillées sur le mouvement humain d'experts pour guider les novices. De plus, les auteurs ont classé le niveau des apprenants selon trois catégories (novice, intermédiaire ou expert) grâce aux mouvements enregistrés en utilisant des techniques de *machine learning*. Les données utilisées (*i.e.* 271 fichiers contenant 40 insertions) comprennent des séries temporelles multivariées représentant la position de l'objet manipulé, la force et la pression exercée par les apprenants dans le temps. L'objectif de cette classification est de fournir des retours aux apprenants afin d'améliorer leurs compétences motrices. Ils peuvent ainsi visualiser des scores sur les performances de leurs gestes en temps réel et les anomalies entre chaque procédure.

Les métriques évaluant les mouvements des apprenants peuvent permettre à ces derniers de s'auto-évaluer durant l'activité. Par exemple, pour l'enseignement de la danse, ARISTIDOU *et al.* (2015) ont proposé un EVAH dans lequel ils ont considéré 27 métriques d'évaluation morphologiques indépendantes (telles que la distance entre les membres, le déplacement, la taille de la démarche, l'accélération, la vitesse, la secousse, le volume, la hauteur des parties du corps, etc.) pour caractériser les mouvements des apprenants en termes d'actions, d'émotions et d'intentions. L'apprentissage consiste pour les apprenants à exécuter et répéter les mouvements de danse grâce à un enseignant représenté par un avatar virtuel en 3D. Le mouvement des enseignants est alors comparé au mouvement de l'apprenant afin d'évaluer les performances de ce dernier (ARISTIDOU *et al.*, 2015).

Dans le domaine médical, PARK *et al.* (2017) ont examiné les effets d'un entraînement avec un EVAH sur la récupération motrice de patients souffrant d'un accident vasculaire cérébral hémiparétique chronique. Les auteurs ont réalisé une expérimentation impliquant 25 patients. Les patients se sont entraînés dans cinq EVAH différents dédiés respecti-

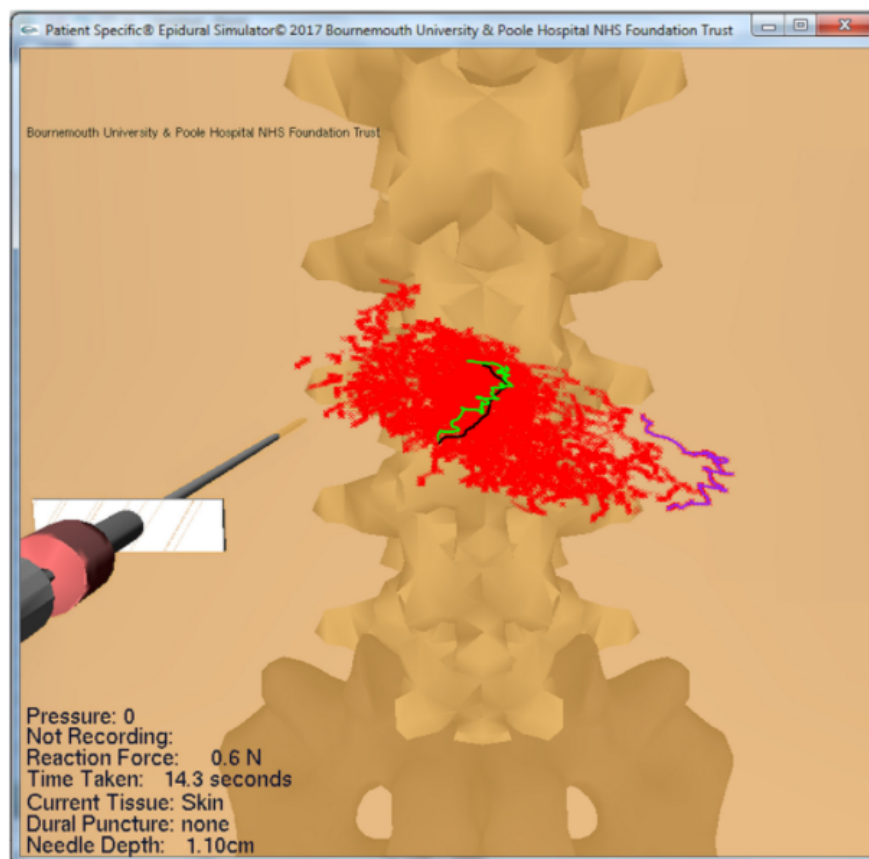


FIGURE 2.8 – Rouge : tracés de tous les points des mouvements d'insertion dans le groupe 1. Noir : La trajectoire prototypique idéale. Vert : La meilleure insertion correspondant étroitement au prototype. Violet : La pire insertion la plus éloignée du prototype (VAUGHAN *et al.*, 2020)

vement à la boxe, au tennis de table, au football, au golf et au ski. L'ensemble de ces EVAH nécessitait l'utilisation des membres supérieurs et inférieurs en étant debout. À l'aide du suivi des mouvements de 20 points clés du corps des patients capturés en utilisant la caméra de profondeur *Microsoft KinectTM*, ils ont montré que l'utilisation d'un EVAH constitue une approche thérapeutique efficace pour améliorer les fonctions motrices pendant la réadaptation post-AVC (PARK *et al.*, 2017).

Dans le sport, lors de l'apprentissage du service au tennis, SAITO *et al.* (2018) se sont intéressés aux mouvements du centre de gravité du corps, des genoux et de la raquette des participants en utilisant les contrôleurs d'un *HTC Vive* et des *trackers Vive* (*cf.* figure 2.9). Les auteurs ont réalisé une expérimentation afin de comparer les types et les trajectoires des services des apprenants à ceux des experts. Leurs résultats indiquent des différences



FIGURE 2.9 – Matériel d'analyse de mouvement fixé à une raquette de tennis (à gauche) et au corps d'un participant (à droite) (SAITO *et al.*, 2018)

entre les experts et les novices dans la préparation, le mouvement des jambes, les retours de reprise, et le degré de torsion de la colonne vertébrale. WANG *et al.* (2018) ont développé un simulateur chirurgical interactif temps réel et haute-fidélité, afin d'améliorer l'efficacité de la formation et de l'enseignement en chirurgie, dans le contexte de la procédure d'ablation par cathéter. Ils analysent les mouvements actuels du cathéter, ainsi que l'historique de ces mouvements en vue d'évaluer l'état de l'objet manipulé. L'objectif est d'appliquer des forces et directions appropriées au cathéter. Un autre point essentiel est d'améliorer la fidélité de l'EVAH, notamment sur l'aspect temporel, c'est-à-dire le temps de détection des collisions. Les résultats préliminaires et les retours des utilisateurs montrent que l'EVAH proposé est réaliste et efficace pour l'acquisition de compétences chirurgicales essentielles. Dans le contexte sportif, SHIM *et al.* (2018) ont conçu un EVAH pour l'apprentissage de l'aviron. Les auteurs ont enregistré les positions des mains gauches et droites ainsi que de la tête des apprenants grâce à un système de capture de mouvement optique. Ces données ont été utilisées pour comparer les mouvements des apprenants évoluant dans la même embarcation. Le principe est de faire avancer le bateau rapidement si les mouvements des apprenants sont similaires et de le ralentir dans le cas contraire. Ceci incite les joueurs à synchroniser leurs mouvements autant que possible pour accélérer leur pirogue dans l'EVAH.

Les EVAH dédiés aux gestes tentent de favoriser l'apprentissage en améliorant la motivation, la rétention d'informations et l'acquisition de compétences motrices. Pour cela, ils utilisent des métriques et des feedbacks spécifiques, permettant de transmettre des

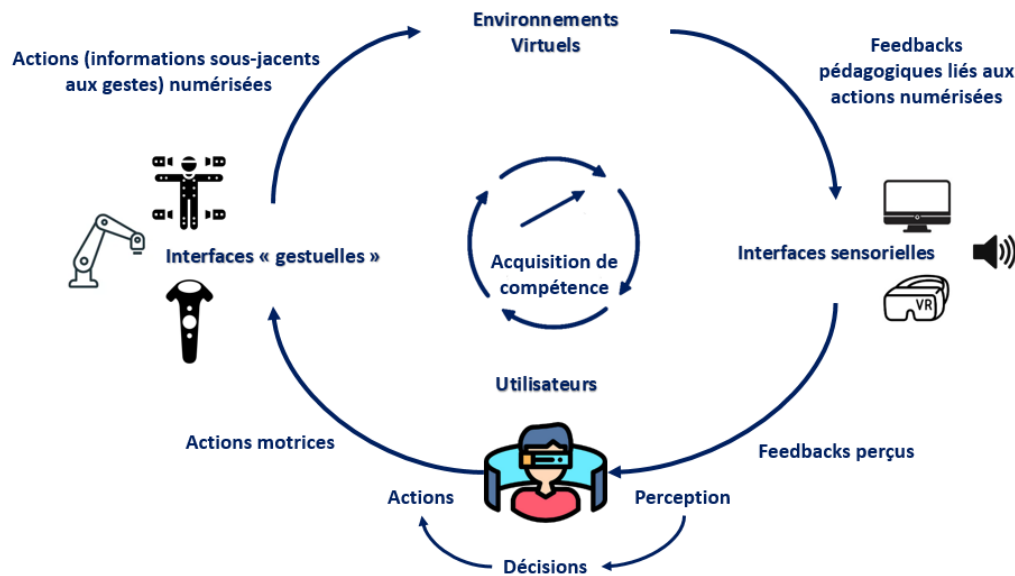


FIGURE 2.10 – Proposition d’une boucle d’interaction spécifique aux EVAH dédiés aux gestes

informations à l'utilisateur relatives : (i) à l'évaluation des gestes et des mouvements sous-jacents produits, (ii) à la progression dans la tâche et (iii), au guidage dans la bonne exécution de ces mouvements. Les EVAH dédiés aux gestes capturent les mouvements des utilisateurs *via* des interfaces gestuelles (*e.g.* *Leap Motion*) pour analyser les mouvements numérisés afin de, *in fine*, fournir ces feedbacks pédagogiques (*cf.* figure 2.10). On constate, à travers la littérature, que ces EVAH sont utilisés dans des domaines d'application variés, et répondent à des objectifs pédagogiques préalablement établis. En outre, ils possèdent leurs propres caractéristiques en termes d'analyse et d'évaluation des mouvements, des métriques et feedbacks fournis aux apprenants ou aux enseignants. Ces spécificités font que les EVAH dédiés à l'apprentissage de gestes sont souvent conçus pour des situations très spécifiques et demeurent dans la majorité des cas « figés » c'est-à-dire uniquement dédiés à la situation d'apprentissage pour laquelle ils ont été conçus. Cela limite les possibilités de réutilisation de ces EVAH en cas d'évolution de la situation d'apprentissage, sans un travail important de réingénierie impliquant une nouvelle analyse des besoins en termes d'observation et d'évaluation de gestes par les enseignants et les apprenants. Il en va de même pour les feedbacks fournis, qui doivent être représentatifs des pratiques de l'expert « évaluateur » et de l'expert « conseil » pour une meilleure appropriation par les apprenants de l'EV.

2.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté dans un premier temps plusieurs techniques de capture de mouvements (*i.e* à base de caméras, inertielles, magnétiques, mécaniques, et reposant sur des dispositifs haptiques), analysé ce que sont un geste et un mouvement et présenté des modèles permettant de représenter numériquement les mouvements. Certaines de ces méthodes permettent de capturer à la fois les mouvements du corps humain ou des objets manipulés (capteurs inertiels, magnétiques, etc.) tandis que d'autres sont spécifiques ou adaptées aux mouvements du corps humain (systèmes mécaniques) ou des objets manipulés (dispositifs haptiques). De plus, leur démocratisation a facilité la création et la mise en place de situations d'apprentissage en particulier celles dédiées aux gestes. Ces techniques de capture de mouvement permettent d'obtenir plusieurs types d'informations (position, rotation, force, pression, etc.) sur les mouvements sous-jacents aux gestes, ces derniers pouvant être numérisés grâce aux différentes méthodes de représentation évoquées dans ce chapitre (notations, graphes, propriétés mécaniques ou géométriques). Les méthodes de représentation des mouvements basées sur les notations, les graphes ainsi que les propriétés mécaniques ne sont initialement pas conçus pour représenter les mouvements des objets manipulés. La méthode basée sur les propriétés géométriques permet de représenter les mouvements de tout ou partie du corps humain et des objets manipulés. Dans la suite de ce chapitre, nous avons rappelé les grands principes de la Réalité Virtuelle (RV), défini et analysé quelques EVAH dédiés à l'apprentissage de gestes tout en les mettant en perspective avec les EVAH ne considérant pas le geste comme l'objet d'étude. La RV permet d'immerger des apprenants dans des Environnements Virtuels (EV) issus du réel ou de l'imaginaire dans lesquels l'utilisateur peut interagir avec ses éléments. De manière générale, les EVAH proposent des outils adaptés pour : (i) faciliter la mise en œuvre de situations d'apprentissage pour les enseignants et (ii) améliorer le processus d'apprentissage pour l'apprenant. En outre, ces EVAH permettent à l'apprenant de travailler en autonomie tout en favorisant la motivation, la rétention d'informations, l'acquisition de compétences, etc. Grâce aux données issues des mouvements capturés, les Environnement Virtuel pour l'Apprentissage Humain (EVAH) dédiés aux gestes proposent divers outils qui permettent aux apprenants d'acquérir ou d'améliorer leurs compétences motrices. Nous avons constaté, à travers les EVAH dédiés aux gestes présentés, que ces derniers sont très dépendants de la situation d'apprentissage. De plus, les métriques liées aux mouvements sont calculées dans l'optique de : (a) évaluer des caractéristiques (*i.e.*

performances, acquisition de compétences motrices, etc.) des apprenants et (b) fournir des feedbacks aux apprenants ou aux enseignants. Peu d'EVAH, actuellement, proposent des moyens aux experts/enseignants pour mettre en place des situations d'apprentissage et évaluer les apprenants, ce qui constitue un frein à leur réutilisation suivant l'évaluation des pratiques pédagogiques et plus généralement de la situation d'apprentissage. En vue de proposer aux enseignants des outils adaptés et efficaces pour mettre en place des EVAH dédiés à l'apprentissage de gestes en fonction de leurs besoins, nous réalisons dans le chapitre suivant, une analyse plus fine de ces EVAH afin d'en comprendre leurs principales caractéristiques en termes de : (i) méthodes d'évaluation, (ii) métriques et éléments de mesure de l'activité, (iii) feedbacks et (iv) possibilités de réingénierie.

ANALYSE DES EVAH DÉDIÉS AUX GESTES

Dans le chapitre précédent, nous avons, d'une part, présenté un ensemble de techniques de capture du mouvement, puis analysé ce qu'est un geste et comment ce dernier peut être numérisé. D'autre part, nous avons défini ce qu'est un Environnement Virtuel (EV) et montré comment ces EV sont utilisés dans diverses situations d'apprentissage en général et dans le cadre de l'apprentissage du geste en particulier. Afin de proposer aux enseignants des outils leur permettant de mettre en place des EVAH dédiés à l'apprentissage de gestes, nous présentons dans ce chapitre un état de l'art sur ces EVAH spécifiques. Cet état de l'art est réalisé dans l'optique d'analyser : (i) les principaux éléments fonctionnels liés à l'analyse de l'activité et l'évaluation (artefacts virtuels impliqués et observés, métriques d'évaluation, feedbacks délivrés à l'utilisateur, etc.) et (ii) l'ingénierie et la réingénierie nécessaires de l'EVAH en cas de modification de la tâche à apprendre ou du domaine, c'est-à-dire dans un contexte de réutilisation et d'adaptation aux pratiques pédagogiques. Dans la première section, nous présentons la méthode de recherche bibliographique utilisée. La deuxième section s'intéresse aux différents types d'analyse de l'activité réalisés dans la littérature en mettant un accent particulier sur l'évaluation des apprenants par les EVAH. La troisième section est axée sur les métriques utilisées pour cette analyse. La quatrième section se concentre sur les feedbacks (*i.e.* visuel, audio et haptique) fournis aux apprenants en EV. Enfin, la cinquième section étudie les aspects de réingénierie des EVAH dédiés aux gestes en fonction des méthodes d'apprentissage utilisées.

3.1 Méthode de recherche bibliographique

La méthode de recherche utilisée est adaptée de celle proposée par KITCHENHAM *et al.* (2007), synthétisée et citée par PELLAS *et al.* (2019). Elle se décompose en trois étapes : (i) la sélection des moteurs de recherche, la définition des critères d'inclusion

et d'exclusion des études, et la définition des catégories pour l'analyse, (ii) la sélection des études, l'extraction, la synthèse, et le codage des données, (iii) l'analyse des résultats et la discussion des constatations, des tendances et des conclusions. Dans la première étape, nous avons choisi les moteurs de recherche suivants : *ACM Digital Library*, *Science Direct*, *IEEE Explore*, *Springer*, *Google Scholar*. Ces moteurs sont les plus connus et utilisés à notre connaissance pour une recherche en informatique (et en EIAH). Nous avons ensuite défini un ensemble de mots clés afin de trouver les articles correspondants à notre objectif d'analyse bibliographique. Ces mots clés sont définis par une combinaison entre *virtual* (*i.e.* mot clé permettant d'identifier les articles liés aux EV) et *motion or gesture* (*i.e.* mots clés permettant d'identifier les articles liés aux mouvements ou aux gestes) et *learning, training, teaching or evaluation* (*i.e.* mots clés permettant de filtrer les articles s'intéressant à l'apprentissage, l'enseignement et l'évaluation). La recherche a été effectuée selon la formule suivante :

$$VIRTUAL \ \& \ GESTURE/MOTION \ \& \\ LEARNING/TRAINING/TEACHING/EVALUATION$$

Cela représente un total de 8 ensembles de mots clés. Nous avons ensuite défini les critères d'inclusions de notre recherche comme suit :

- a) Études publiées depuis 2010
- b) Études ayant comme contexte l'apprentissage ou l'enseignement de gestes
- c) Études utilisant des environnements virtuels

Il est à noter que seules les études rédigées en anglais ou en français sont considérées. Tous les articles ne respectant pas ces critères sont par conséquent exclus. L'organigramme de la figure 3.1 synthétise l'ensemble de notre démarche.

À partir des mots clés définis, nous avons réalisé nos recherches sur chacun des moteurs susmentionnés en utilisant les paramètres par défaut (*i.e.* recherche par pertinence sur l'ensemble des moteurs). Nous avons ensuite étudié les 8 premières pages des résultats de recherche pour chaque moteur (le nombre d'articles par page varie d'un moteur à un autre). En effet, nous avons observé, sans toutefois le montrer formellement, que les articles des pages suivantes (*i.e.* après la 8^{ième} page) ne respectaient pas au moins un des trois critères. La lecture des titres et des résumés nous a permis de retenir 137 articles sur un total de 5338 articles. La lecture complète des articles restants nous a permis de retenir définitivement 103 articles. Ces 103 articles font l'objet de notre analyse dans

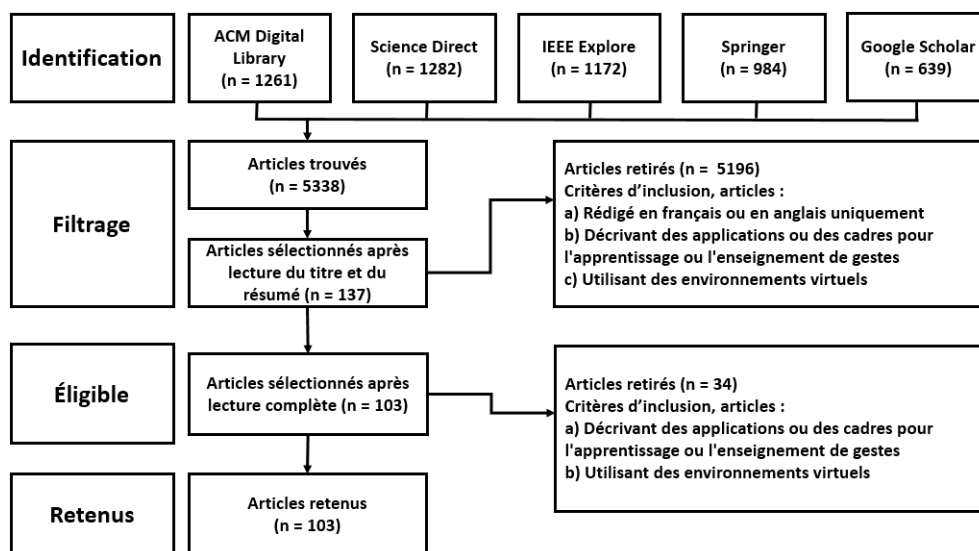


FIGURE 3.1 – Organigramme du processus de sélection des articles associés aux publications d'EVAH dédiés à l'apprentissage de gestes

le reste de ce chapitre. Pour chaque article, les attributs suivants ont été retenus pour notre analyse : (a) la discipline/le domaine d'application de l'étude ; (b) la description de la tâche à apprendre ; (c) les objets/artefacts impliqués dans les gestes et mouvements produits ; (d) les évaluations réalisées dans ces études si existantes ; (e), les métriques calculées faisant état de l'évaluation ainsi que les feedbacks pédagogiques utilisés.

L'inclusion de bases de données d'articles scientifiques orientées en santé telle que « Pubmed » a été questionnée. Après une première recherche, nombreux sont les articles traitant de l'apprentissage et l'enseignement de gestes liés à l'application de protocoles de soins, de gestes chirurgicaux, etc. via des EV. Nous avons trouvé en majorité deux types d'articles dans ce contexte : (a) le premier faisant un état de l'art exhaustif des différents simulateurs virtuels ou de l'apport de la réalité virtuelle pour l'apprentissage de gestes techniques d'un sous-domaine de la santé précis (par exemple les gestes de chirurgie dentaire en implantologie) ; (b) le second étudiant en détail les propriétés d'un simulateur virtuel ciblé pour un usage tout aussi spécifique, par exemple un simulateur virtuel pour réaliser des examens cliniques (abdomen, thorax, etc.) sur des patients virtuels (DE PONTI *et al.*, 2020). Nous avons choisi de ne pas inclure dans cette étude ces publications pour deux raisons :

- Les articles de type état de l'art en santé, nous permettent difficilement d'extraire les informations liées à l'ensemble des points d'analyse mentionnés précédemment

suivant l’objectif scientifique (par exemple, certains articles portent uniquement sur les protocoles de validation des simulateurs virtuels)

- Les simulateurs spécifiques sont généralement des simulateurs « hautes fidélités » et impliquent l’utilisation d’interfaces multimodales très avancées afin de restituer avec une grande précision les modèles 3D et leur représentation physique. Ces équipements ne sont pas accessibles à moyen ou bas coût et souvent construits ou assemblés en fonction d’un contexte d’apprentissage très spécifique, donc peu ou pas réutilisables et adaptables en cas d’évolution de la situation d’apprentissage.

Néanmoins, des articles étudiant l’apprentissage de gestes en santé à l’aide d’EV ont été trouvés en grand nombre (*i.e.* 45 articles sur 103) dans les bases de données sélectionnées. Le domaine de la santé est donc bien présent dans notre état de l’art.

Les 103 articles retenus ont été analysés selon plusieurs critères (*i.e.* évaluations réalisées, métriques et feedbacks utilisés, etc.). Cette analyse nous a conduits à mettre en évidence 3 domaines clés non exclusifs utilisant les EVAH dédiés aux gestes. Il s’agit du domaine médical (*e.g.* apprendre à remarcher), sportif (*e.g.* apprendre le snowboard), industriel (*e.g.* apprendre la soudure). Certains des articles analysés (*e.g.* apprendre à écrire, jouer d’un instrument, etc.) n’appartiennent à aucun des domaines ci-dessus et leur faible nombre (6) ne permet pas de les présenter dans des domaines différents. Nous présentons ainsi ces articles dans une catégorie nommée “autres domaines”. Ce qui porte le nombre de domaines identifié à 4. La figure 3.2 montre la répartition des parutions des études liées à l’apprentissage de gestes dans les EVAH depuis 2010 en fonction des différents domaines susmentionnés. On constate qu’entre 2015 et 2019, le nombre total d’études publiées a considérablement augmenté puis drastiquement baissé en 2020. La crise de la *COVID-19* pourrait en être la raison. De plus, on observe que les domaines de la santé (46) et du sport (38) sont les domaines dont la recherche sur les EVAH dédiés aux gestes est la plus active. En outre, dans la majorité de ces études, des évaluations ont été réalisées. Ces évaluations portent sur plusieurs caractéristiques (*i.e.* performances, compétences, utilisabilité, etc.) en fonction de l’entité évaluée (*i.e.* utilisateurs ou EVAH). La notion d’évaluation peut avoir différents sens et méthodes d’application dans les études observées. La section suivante étudie, par conséquent, les différents types d’évaluations effectuées dans les EVAH dédiés aux gestes.

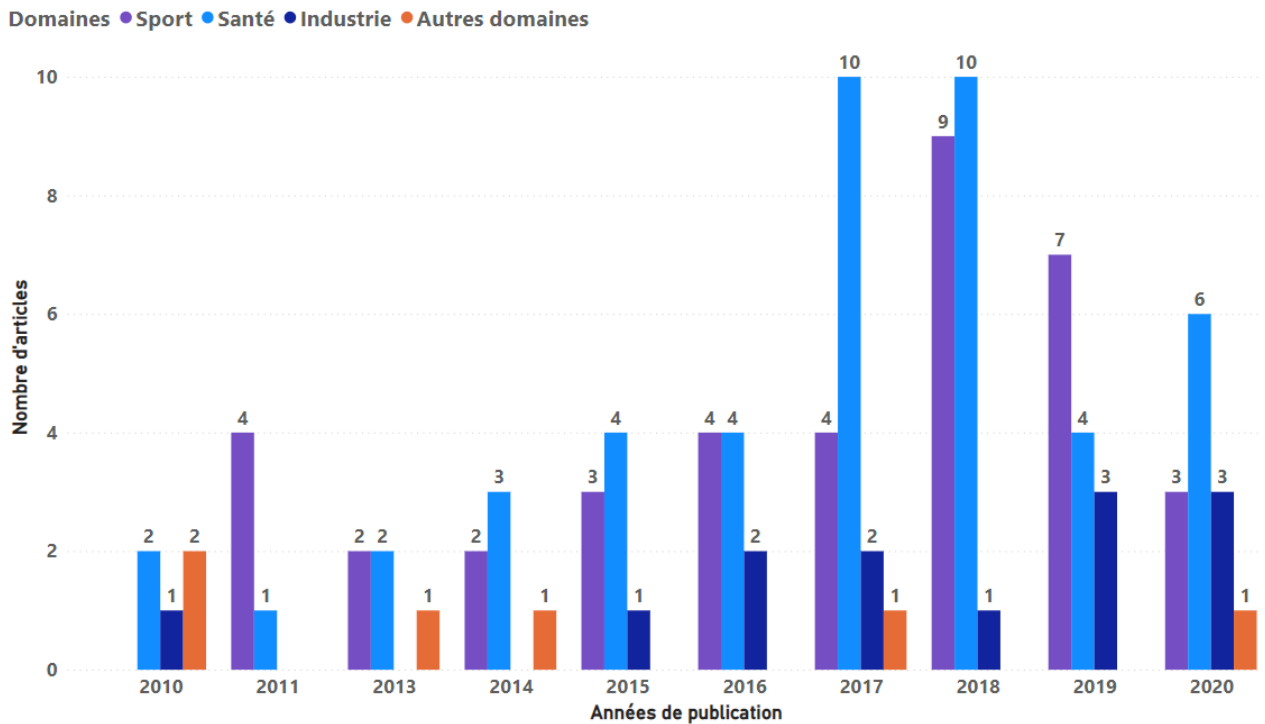


FIGURE 3.2 – Tendence des publications sur l'apprentissage du geste en fonction des domaines depuis 2010

3.2 Évaluation dans les EVAH dédiés aux gestes

3.2.1 Définition, acteurs, objets et objectifs

Selon le dictionnaire Larousse, l'évaluation se définit comme « *l'action d'évaluer, de déterminer la valeur de quelque chose* ». Dans le contexte éducatif, YVES *et al.* (2013) définissent l'évaluation comme : « *la prise d'informations qu'effectue un acteur quelconque d'une situation de travail (enseignant, élève, établissement scolaire, système d'enseignement ou de formation, etc.) sur les performances identifiables ou les comportements mis en œuvre par les personnes qui relèvent de cette situation (classe, établissement, système d'éducation, de formation, etc.), en les rapportant à des normes ou à des objectifs* ». L'évaluation peut donc être effectuée par un autre évaluateur que l'enseignant (*e.g.* par d'autres élèves, par l'élève lui-même, etc.) et sur d'autres acteurs que les élèves (au niveau de l'établissement, les enseignants, les chefs d'établissement, etc.) (YVES *et al.*, 2013). Dans le contexte des EVAH dédiés aux gestes, nous avons observé que l'évaluation peut porter sur l'apprenant, l'EVAH ou ces deux entités. Ces évaluations se focalisent en gé-

néral sur plusieurs caractéristiques propres à l'EVAH ou ont pour objet l'amélioration de compétences ou d'un comportement chez l'apprenant. Il s'agit d'une part de l'utilisabilité, l'utilité, la performance, etc. des EVAH proposés, et d'autre part de la rétention d'informations, l'acquisition et le transfert de compétences (*i.e.* en particulier les compétences motrices), la motivation, l'engagement, etc. chez les apprenants. Ainsi, dans cette section, nous étudions les évaluations réalisées au sein des travaux consacrés aux EVAH dédiés à l'apprentissage de gestes, au travers de quelques exemples jugés comme représentatifs. MIKI *et al.* (2016) utilisent un EVAH pour l'apprentissage de l'ablation des glandes sous-mandibulaires sous l'assistance d'un endoscope. Dans ce contexte, les auteurs ont évalué les performances de l'EVAH et l'acquisition de compétences chez les apprenants grâce à des métriques (*i.e.* durée de l'opération, nombre d'essais, etc.) calculées, en partie, à partir du mouvement de deux pinces de Péan manipulées par l'apprenant dans l'EVAH. Leurs résultats indiquent que le temps et le nombre d'erreurs des participants diminuent de manière significative au bout du septième essai. De plus, le temps moyen et le nombre d'erreurs des participants utilisant la RV ont été considérablement réduits après le premier essai comparé aux participants n'utilisant pas la RV. LIN *et al.* (2018) ont proposé un EVAH pour l'apprentissage des techniques de Tai Chi en aidant les apprenants à affiner la distribution de leur pression plantaire (PPD - *Plantar Pressure Distribution*). Les auteurs ont étudié l'efficacité de l'EVAH avec et sans feedbacks afin de mesurer l'impact de l'EVAH avec des feedbacks sur les performances des apprenants. Les apprenants sont issus de deux groupes *i.e.* utilisant ou non des feedbacks (*e.g.* visualisation du squelette de l'expert superposé à l'utilisateur) proposés par l'EVAH. La comparaison des scores de la distribution de la pression plantaire et de la posture des apprenants a permis de constater que le groupe utilisant l'EVAH proposé avec des feedbacks obtient de meilleures performances. Les scores sur la distribution plantaire et la posture sont obtenus grâce au *DTW* appliqué aux mouvements de plusieurs articulations du corps (le cou, les épaules, les coudes, les poignets, les hanches, les genoux et les chevilles) des apprenants et des experts (LIN *et al.*, 2018). Le *DTW* (*Dynamic Time Warping*) vise à comparer la forme de deux signaux sans tenir compte de l'aspect temporel (c'est-à-dire la durée ou la fréquence du signal) en produisant : (a) une matrice de corrélation évaluant la distance entre chaque point des deux signaux et (b), un score étant la somme des distances minimales pour passer d'un signal à l'autre (plus le score est faible, plus les signaux sont similaires) (MOREL, 2017). Dans un contexte industriel, BELLARBI *et al.* (2019) ont proposé un EVAH avec un scénario de travail du bois opérationnalisé (*c.f.* figure 3.3) dans lequel l'apprenant doit

réaliser une série d'actions en utilisant divers outils (*ex.* perceuse, scie, etc.). Les chercheurs ont évalué la performance de l'EVAH lors de l'identification des gestes réalisés par les apprenants avec 10 participants.



FIGURE 3.3 – Exemple d'un apprenant réalisant certaines actions du scénario (BELLARBI *et al.*, 2019)

Cette identification se fait grâce aux codes *Methods-Time Measurement* (MTM). Ces codes MTM associent à chaque mouvement (de la tête, des mains et des yeux) un temps prédéterminé et certains détails (*ex.* la précision de l'action, la masse de l'objet manipulé, etc.). L'EVAH obtient de bons résultats (*i.e.* 5 erreurs sur 80 mouvements) en termes de reconnaissance des codes MTM, qui sont validés par des experts MTM. Ce système pourrait être utile dans des ateliers industriels pour assister les experts dans l'évaluation des opérations manuelles. Dans le cadre de la thérapie physique, WEI *et al.* (2015) ont proposé un EVAH dans lequel les mouvements des parties du corps (*i.e.* 20 articulations du corps) des apprenants sont comparés à ceux de l'expert en temps réel notamment grâce au *GB-DTW* (*Gesture-Based Dynamic Time Warping*), une variante du *DTW*. Contrairement au *DTW* qui calcule un score à partir de deux mouvements, le *GB-DTW* segmente l'ensemble des deux mouvements en plusieurs séquences et fournit un score d'évaluation pour chaque séquence en temps réel. Les performances des apprenants ont été évaluées en comparant leurs mouvements à ceux des experts (WEI *et al.*, 2015). Ainsi, les apprenants ont reçu en temps réel des feedbacks textuels (*i.e.* "bras trop haut, trop rapide, trop lent") corrélés aux évaluations réalisées. DEL BIMBO *et al.* (2017) ont conçu un EVAH dénommé *Basic Life Support Defibrillation* (BLSD-S) pour former des opérateurs médicaux dans l'acquisition de compétence décisionnelle et pour améliorer leurs performances dans l'exécution des procédures de sécurité standard. L'utilisabilité de l'EVAH a été analysée avec 10 évaluateurs (dont six chercheurs dans le domaine des systèmes interactifs et quatre opé-

rateurs médicaux dans le domaine de la médecine d'urgence) à travers un questionnaire composé de 10 questions. Les résultats montrent que les utilisateurs étaient très engagés dans l'expérience virtuelle, même s'il existe encore des problèmes liés à la compréhension des gestes à réaliser, à l'interaction avec les objets et à l'accomplissement des tâches. La deuxième version du système a permis d'améliorer l'expérience utilisateur. BLUMSTEIN *et al.* (2020) ont réalisé un EVAH pour l'apprentissage de l'enclouage intra-médullaire (IMN) d'un tibia. L'objectif était de démontrer que la formation utilisant la RV peut être plus efficace par rapport à l'apprentissage impliquant des outils plus traditionnels tels qu'un guide standard (SG). Les participants (20) sont des étudiants en médecine et ont été divisés en deux groupes (RV ou SG). Les participants ont été observés durant la procédure, puis sont évalués par un chirurgien à l'aide d'une liste de contrôle spécifique à la procédure et basée sur une échelle d'évaluation globale en 5 points. Les scores d'évaluation globaux étaient significativement plus élevés pour le groupe en RV comparé au groupe SG. Le pourcentage d'étapes complétées correctement était significativement plus élevé dans le groupe RV par rapport au groupe SG. L'amélioration moyenne entre la première et la deuxième phase de l'étude était plus élevée dans le groupe RV par rapport au groupe SG dans les 5 catégories de l'échelle d'évaluation globale, et significativement plus élevée pour la connaissance des instruments. CHAN *et al.* (2011) propose un EVAH de formation en danse basée sur les technologies de capture du mouvement. Dans l'une de leurs expérimentations, les auteurs ont étudié la motivation des participants utilisant l'EVAH proposé par rapport à ceux utilisant une approche traditionnelle (*ex.* regardant une vidéo) grâce à un questionnaire composé de 4 questions avec 3 réponses possibles. Leurs résultats indiquent que l'EVAH proposé est intéressant et capable de motiver les sujets à apprendre. À condition que ces derniers aient un peu d'intérêt pour la danse. Selon les commentaires supplémentaires recueillis, certains sujets ont trouvé que les feedbacks (scores) fournis leur ont permis de mieux réaliser la tâche. La figure 3.4 présente les entités évaluées dans le cadre des travaux sur les EVAH dédiés aux gestes. On constate que peu d'articles (7/103) n'effectuent aucune évaluation. Les EVAH proposés sont aussi souvent évalués (64/103) que les apprenants utilisant ces EVAH (55/103). En conséquence, on note que l'évaluation des apprenants n'est pas toujours réalisée (48/103).

La figure 3.5 présente les caractéristiques évaluées chez les apprenants (motivation, performance, acquisition de compétences, rétention d'informations et transfert de compétences). La performance des apprenants est de loin la caractéristique la plus évaluée, peu importe le domaine. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que les EVAH dédiés

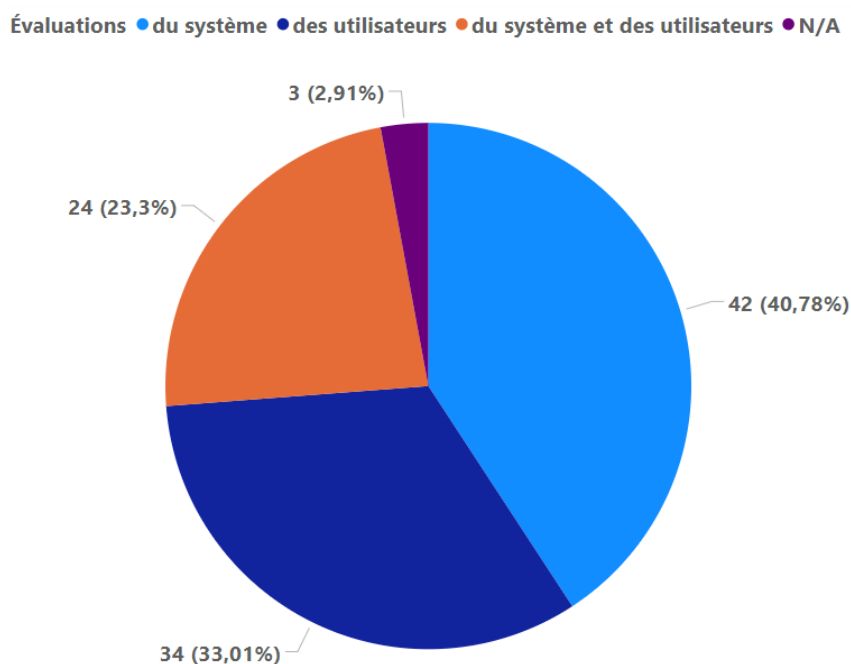


FIGURE 3.4 – Répartitions des évaluations réalisées en fonction des entités évaluées

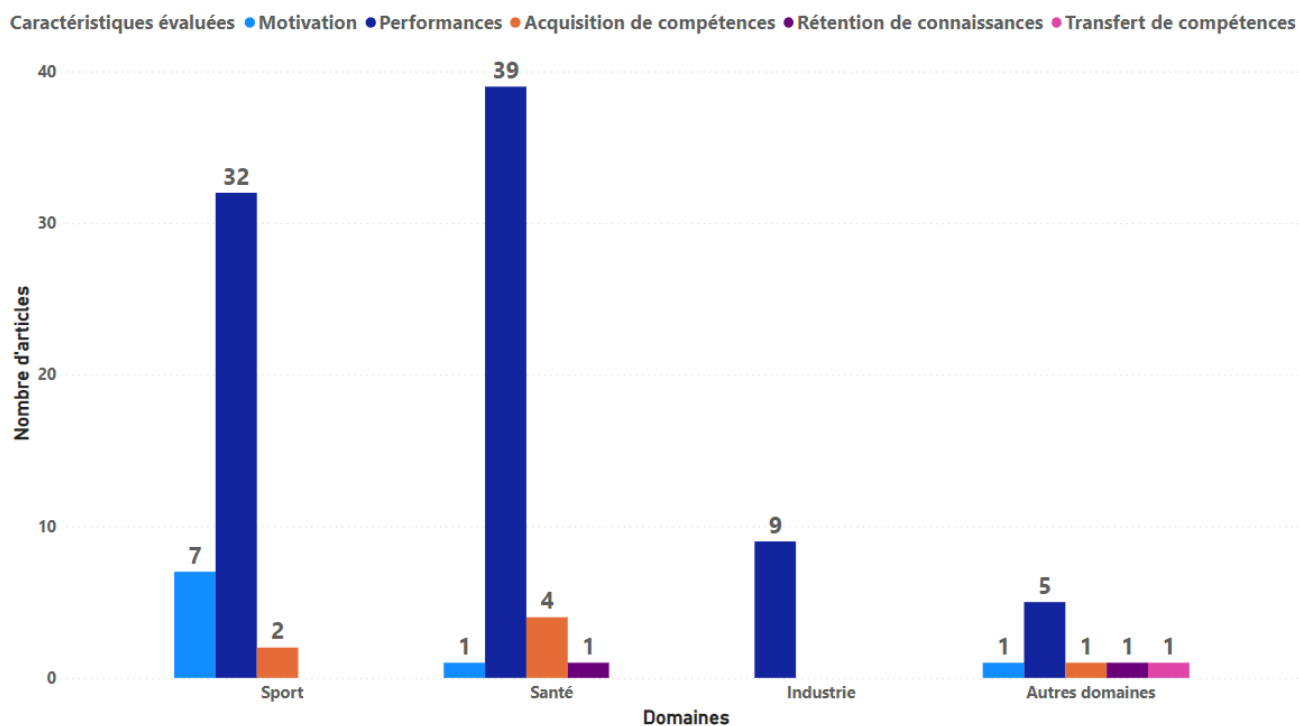


FIGURE 3.5 – Évaluation des apprenants dans les EVAH répartis sur 4 domaines

aux gestes ont pour objectif de favoriser l’acquisition de compétences motrices. Évaluer les performances des apprenants par les enseignants est un processus souvent empirique, fastidieux suivant les tâches considérées. De plus, ce processus est basé sur les capacités de perception des enseignants, qui sont parfois mises à l’épreuve si la performance porte sur des caractéristiques cinématiques, dynamiques ou géométriques des mouvements en cas de gestes précis, rapides et/ou complexes.

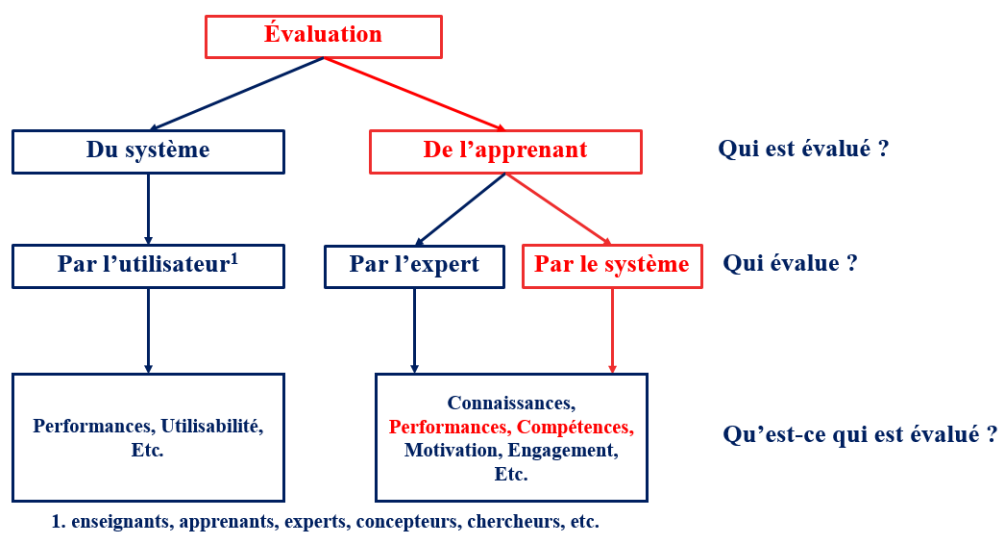


FIGURE 3.6 – Évaluations dans les EVAH

À travers les exemples présentés dans cette section, nous avons identifié les éléments impliqués dans le processus d’évaluation dans les EVAH dédiés aux gestes. Ces évaluations s’intéressent à l’apprenant (la motivation, l’acquisition de compétences motrices, etc.) ou l’EVAH lui-même (l’utilisabilité, l’utilité, etc.) et sont réalisées par des acteurs divers et variés (apprenants, enseignants, ergonome, etc.). Une synthèse des entités évaluées et celles réalisant les évaluations est présentée à la figure 3.6. De manière générale, l’évaluation des apprenants n’est pas toujours réalisée. Même lorsqu’elle est réalisée, ces évaluations ne portent pas nécessairement sur les performances ou les compétences motrices des apprenants. Dans ces travaux, nous nous intéressons à l’automatisation (*i.e.* réalisé par l’EVAH) de l’évaluation des performances et des compétences motrices des apprenants. Dans ce contexte, il est nécessaire d’identifier de façon détaillée les éléments impliqués dans ce processus d’évaluation.

3.2.2 Types d'analyse de la performance et des compétences motrices

Notre objectif est de proposer des outils et méthodes permettant aux enseignants de construire des situations d'apprentissage à partir d'EV existants pour l'apprentissage de compétences motrices. Dans ces situations, nous souhaitons obtenir une amélioration de l'apprentissage au travers d'une boucle d'interaction continue délivrant des feedbacks à l'apprenant portant sur l'évaluation de sa tâche, sa progression ou sa bonne exécution. Ces feedbacks ont pour objectif de donner une information claire et intelligible à l'apprenant issue d'une interprétation experte des valeurs des métriques opérationnalisables et caractérisant les gestes effectués. Ainsi, dans la suite de cette section, nous nous intéresserons aux fonctionnalités d'évaluation mises en place dans les EVAH portant sur les performances liées aux gestes et l'acquisition de compétences motrices chez les apprenants. Il est tout d'abord nécessaire de revenir sur la notion de performance et de compétences motrices dans notre contexte. Ces deux notions sont considérées avec des points de vue hétérogènes selon les travaux. Selon SCHMIDT (1997) : « *dans le cadre de la compétence motrice, le facteur fondamental de la réussite est la qualité du mouvement lui-même, alors que la perception, et la décision qui s'ensuit sur le choix du mouvement à faire sont pratiquement absentes. Par exemple, le sauteur en hauteur sait exactement ce qu'il a à faire (sauter par-dessus la barre), mais le problème est que les mouvements doivent être réalisés aussi efficacement que possible pour maximiser la hauteur franchie* ». Dans un certain sens, la performance et l'acquisition de compétences motrices sont des concepts étroitement liés, et l'analyse de ces concepts passe par l'évaluation des actions des apprenants. Cette évaluation est une tâche dépendante du contexte qui est encore difficile à définir. Cette tâche dépend généralement de l'objectif final du geste effectué, de la stratégie pédagogique, de ce qui est évalué et des besoins d'observation des experts. De plus, l'évaluation des mouvements dépend du fait que le mouvement est considéré comme une série temporelle constituée de données géométriques (*i.e.* un ensemble de positions et d'orientations 3D de chaque articulation du squelette ou des objets manipulés au cours du temps) ou non. Les évaluations des performances ou des compétences motrices des apprenants dans les EVAH dédiés aux gestes sont en général liées à un Objet d'Intérêt (OI), sauf dans le cas où le temps est la seule métrique considérée par le système d'évaluation. Dans ce dernier cas, par exemple, dans le cadre de la rééducation de patient post-AVC, SWEE *et al.* (2017) ont évalué les performances des apprenants en mesurant et comparant

le temps de chaque essai utilisé pour terminer les activités. La première activité consistait à prendre et à déplacer des blocs à la main tandis que la deuxième activité consiste à marcher en ligne droite. Cette méthode d'évaluation ne tient pas compte des données liées aux gestes des apprenants, ce qui entraîne une perte d'informations. Les OI sont des objets virtuels manipulés ou des parties du corps dont les mouvements sont observés, analysés et/ou évalués par les experts/enseignants. La figure 3.7 présente les OI impliqués dans l'évaluation de l'activité des apprenants dans les EVAH dédiés aux gestes. Dans les travaux évaluant les apprenants, les parties du corps humain sont les OI les plus observés (43), suivis par les objets manipulés (13) puis les deux entités (8). Ces observations révèlent l'importance des OI dans les EVAH dédiés aux gestes.

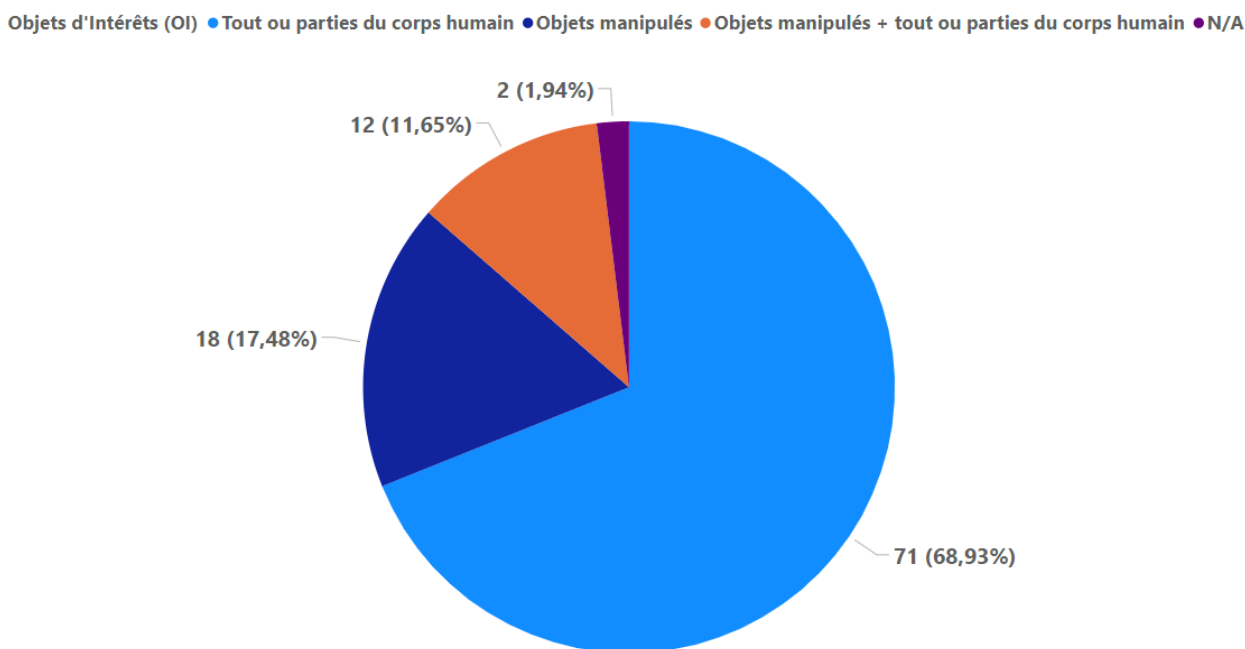


FIGURE 3.7 – Objets d'Intérêts (OI) impliqués dans les évaluations

Pour résumé, trois types de méthodes d'évaluation des performances et des compétences motrices non exclusives ressortent de cette étude suivant que le geste soit perçu comme : (a) une séquence ordonnée d'actions à apprendre (ou non), ou une série temporelle de données géométriques dont (b), des postures qui doivent être imitées dans le temps ou (c), un mouvement respectant des propriétés cinématiques, dynamiques et/ou géométriques calculées à partir de mouvements à respecter. Dans chaque cas, il convient de définir l'objet d'observation et d'analyse.

3.2.2.1 La séquence d'actions à apprendre

Dans le cas où le mouvement n'est pas considéré comme une série temporelle, l'évaluation se fait en observant si l'objet ou la partie du corps évalué respecte une séquence ordonnée (ou non) d'actions. Par exemple, JIANG *et al.* (2016) a proposé un EVAH pour la formation à l'assemblage. Les auteurs ont généré des séquences de montage basées sur le démontage en identifiant au cours du processus de démontage la contrainte d'assemblage de chaque pièce. Les apprenants sont évalués en comptant le nombre de mauvaises étapes réalisées. De même, PILATI *et al.* (2020) ont proposé un EVAH pouvant assister en temps réel les opérateurs impliqués dans des procédures d'assemblage. Des experts ont exécuté des séquences d'actions consécutives pour l'assemblage d'objets dans diverses situations. Les auteurs évaluent ces séquences en temps réel grâce à un concept appelé "*Control Volumes (CVs)*". Un CV est un objet virtuel de forme géométrique prédéfinie qui est utilisé pour vérifier si les articulations du corps de l'opérateur "entrent dans le"/"sortent du" CV (PILATI *et al.*, 2020). Malheureusement, avec cette approche, les mouvements sous-jacents de l'apprenant menant aux manipulations d'objets ne sont pas évalués, ce qui entraîne une perte d'informations ne permettant d'apprendre correctement les mouvements acceptables à effectuer (par exemple pour éviter des troubles musculo-squelettiques sur le long terme). De plus, aucune corrélation n'est faite entre les propriétés des mouvements et la performance ou la qualité de la tâche produite.

3.2.2.2 La succession de postures à imiter

Lorsque le mouvement est considéré comme une série temporelle constituée de données géométriques, plusieurs approches peuvent être utilisées. Une évaluation empirique du geste basée sur la visualisation des mouvements 3D de l'expert et de l'apprenant dans un EVAH a été utilisée dans plusieurs études. C'est le cas, par exemple, dans YOSHINAGA *et al.* (2018) où les auteurs ont développé un EVAH pour l'apprentissage du tir à l'arc traditionnel japonais, en affichant aux apprenants les mouvements de leurs corps superposés en temps réel avec celui d'un expert (*cf.* figure 3.8).

Cette méthode permet aux apprenants de s'auto-évaluer en temps réel et ainsi d'ajuster leurs mouvements. LE NAOUR *et al.* (2019) ont réalisé une revue approfondie sur les avantages de l'observation de modèles 3D pour l'apprentissage du mouvement. Ils ont comparé différentes techniques de visualisation utilisant l'avatar virtuel de l'apprenant et celui de l'enseignant (*e.g.* superposés ou non ; les deux animations jouées simultanément

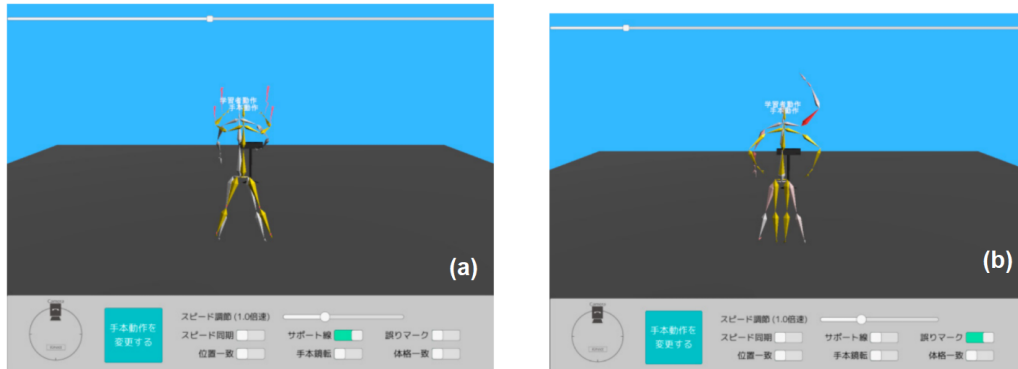


FIGURE 3.8 – Visualisation des mouvements superposés (Les os gris appartiennent à un apprenant. Les os jaunes appartiennent à un expert). (a) Montre les prochaines trajectoires des articulations cibles (courbes rouges) (b) Montre les os d'erreur de l'apprenant (os rouges) (YOSHINAGA *et al.*, 2018)

ou non, les animations jouées pendant la tâche ou après, etc.). La tâche considérée était le lancer d'un ballon de rugby et ils ont mis en évidence les avantages d'une approche superposée (les deux avatars affichés de manière concurrente et synchronisés spatialement à partir d'un pied). De plus, une nouvelle métrique pour mesurer la régularité spatiale du mouvement à apprendre basée sur l'algorithme du *DTW* a été proposée. Utiliser uniquement des avatars virtuels 3D pour l'analyse de l'activité et son évaluation repose fortement sur les capacités de perception des apprenants et des enseignants, y compris l'expertise de ces derniers (LE NAOUR *et al.*, 2019). Bien que largement utilisée, car reposant sur un apprentissage « intuitif » par observation et imitation, cette méthode souffre du problème de synchronisation temporelle et spatiale des mouvements de l'apprenant et de l'expert ainsi que de la prise en compte de morphologies différentes.

3.2.2.3 Les propriétés cinématiques, dynamiques et géométriques à respecter

Les mouvements peuvent être étudiés sous l'angle de leurs propriétés géométriques, cinématiques et/ou dynamiques. L'apprenant est ici libre de créer son propre mouvement du moment qu'il respecte ces propriétés ou descripteurs, servant à l'analyse ou l'évaluation de l'expert. En ce sens, LARBOULETTE *et al.* (2015) ont proposé une classification des descripteurs représentant l'expressivité des mouvements selon les trois types précédemment cités et considérés comme des descripteurs de “bas niveau”. Les auteurs ont également identifié des descripteurs de “haut niveau”, calculés à partir des descripteurs de bas niveau et classés en quatre catégories (corps, espace, forme, effort). Cette catégorie

de descripteur représente “des quantités cinématiques, spatiales ou physiques qui peuvent donner lieu à une interprétation par des experts”. HAMENT *et al.* (2017) ont développé un EVAH pour la formation des débutants au snowboard tout en atténuant les risques liés à la pratique de ce sport. L’analyse des accélérations et de la stabilité des mains, de la tête et de la plateforme du snowboard a permis aux auteurs d’évaluer les performances des apprenants. Lors d’importantes blessures à la main, les patients perdent partiellement ou totalement la capacité de saisir des objets ou de bouger leurs doigts. Dans ces situations, en mesurant l’angle de saisie, la force de saisie et la force de pincement, les thérapeutes peuvent évaluer quantitativement l’effet des traitements afin de les ajuster sur la base de ces informations (FAZELI *et al.*, 2018). Cependant, en analysant spatialement et temporellement le mouvement dans son ensemble, l’utilisateur peut manquer certaines sous-étapes dans sa réalisation surtout si le mouvement est complexe, cette décomposition en étapes étant cruciale pour faciliter le processus d’apprentissage « pas à pas ».

3.2.2.4 Synthèse et positionnement

L’évaluation de l’acquisition de compétences et des performances des apprenants passe par des métriques calculées pendant ou après la réalisation de la tâche et liées : (i) au temps de l’activité ou d’une action (ii) à des séquences d’actions liées à ces gestes et (iii) aux caractéristiques cinématiques, dynamiques et/ou géométriques des mouvements sous-jacents aux gestes réalisés. L’évaluation basée sur le temps de l’activité ou d’une action est en général facile à comprendre, l’objectif étant que ce temps baisse progressivement entre plusieurs essais. Cependant, cette évaluation ne tient pas compte des caractéristiques des gestes ou des mouvements (*i.e.* séquences et analyses spatio-temporelles) réalisés. De même, l’évaluation des gestes à travers les séquences d’actions réalisées par les apprenants suit généralement une approche pédagogique par étape et se focalise sur la sémantique et la finalité des actions réalisées. Elle permet dans la plupart des cas d’alerter l’apprenant lorsqu’une étape est manquée ou de lui fournir à la fin de l’activité un ensemble de statistiques sur les étapes réussies ou à retravailler. Ce type d’évaluation ne tient pas compte des aspects spatio-temporels des gestes. De plus, la détection des étapes manquées et/ou réalisées nécessite de mettre en place des systèmes rendant très spécifiques les EVAH ainsi construits. L’évaluation empirique à partir de l’observation d’un avatar 3D des gestes, ou par analyse des propriétés géométriques, cinématiques et dynamiques ne formalise pas, en général, de manière opérationnalisable, les étapes clés du mouvement. De plus, si on considère une approche comparative, il est nécessaire d’avoir des données des mouvements

de l'expert ou son appréciation sur les valeurs d'acceptabilité des propriétés pour la réaliser. Néanmoins, ces deux méthodes présentent l'avantage d'analyser qualitativement les gestes ce qui peut s'avérer crucial dans certains domaines (*e.g.* rééducation de patient). Dans cette thèse, nous tentons de combiner les trois méthodes d'évaluation évoquées ci-dessus afin de tirer les bénéfices de chacune, tout en compensant leurs inconvénients. En conséquence, dans la section suivante, nous étudions plus en profondeur les métriques couramment utilisées lors de l'évaluation des apprenants dans les EVAH dédiés aux gestes.

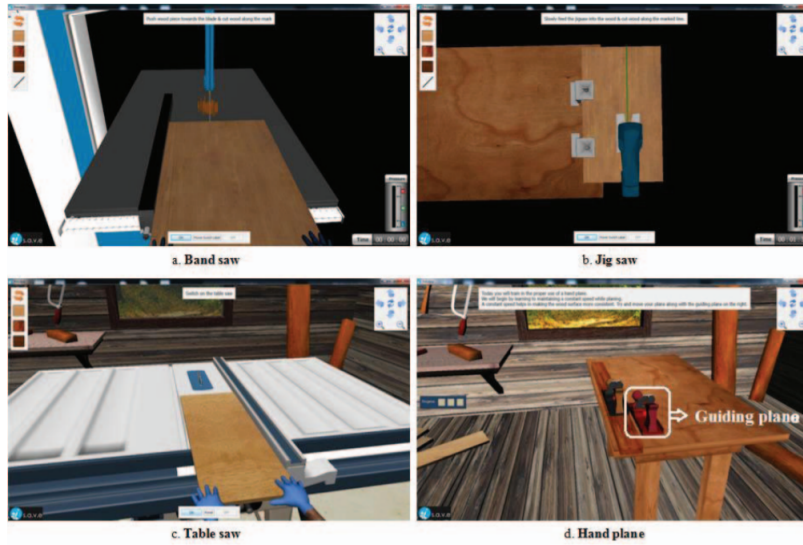
3.3 Les métriques dans les EVAH dédiés aux gestes

L'évaluation des performances et de l'acquisition de compétences motrices chez les apprenants passe par l'utilisation de métriques faisant état de : (i) la qualité de la tâche exécutée, (ii) la progression de l'apprenant dans la réalisation de la tâche. Dans cette section, nous allons présenter un ensemble de métriques issues de notre étude bibliographique. Nous proposerons par la suite une classification de ces métriques selon un double objectif : (i) proposer un état de l'art des métriques utilisées dans le contexte des EVAH dédiés aux gestes en fonction des besoins d'observations et de la situation d'apprentissage et (ii), étudier ces métriques sous l'angle de leur réutilisation et leur adaptation à différents contextes. BÖHME *et al.* (2008) définissent les métriques comme le fait d'"attacher" un nombre à un objet, c'est-à-dire représenter certains aspects de l'objet d'une manière quantitative. Il s'agit, par exemple, de mesurer des observations (température, humidité) par rapport à un objet (emplacement) avec des chiffres ou des catégories (chaud, sec, pluvieux, etc.) (BÖHME *et al.*, 2008). Dans les EVAH, les métriques sont la plupart du temps calculées par le système et très rarement par les experts. Dans ce dernier cas, par exemple, ADOLF *et al.* (2019), l'expert comptait lui-même le nombre de tentatives réussies lors de l'apprentissage du jonglage. BUESCHER *et al.* (2018) ont mis en place un EVAH pour étudier l'effet du retour continu des paramètres du mouvement lors d'une intervention chirurgicale faisant intervenir la laparoscopie. Dans ce contexte, le système a automatiquement enregistré le temps de l'opération, les pénalités liées aux erreurs (en seconde), les longueurs de parcours des instruments, le nombre de mouvements effectués, la vitesse et le temps d'inactivité (BUESCHER *et al.*, 2018). Dans un contexte éducatif, ANDERSON *et al.* (2013) utilisent un ensemble de métriques (*i.e.* KR , KP , $RMSE$) pour l'analyse des formes de « croquis d'écriture ». Selon WINSTEIN *et al.* (1990), le KR (*Knowledge of Results*) fait référence aux informations extrinsèques (*ex.* nombre d'essais ou de tirs réussis,

etc.) sur la réussite de la tâche fournie à l'apprenant à la fin d'un essai pratique. Ces informations servent de base aux corrections d'erreurs lors de l'essai suivant et, en tant que telles, peuvent conduire à des performances plus efficaces à mesure que la pratique se poursuit (WINSTEIN *et al.*, 1990). Le *KP* (*Knowledge of Performance*) peut être divisé en informations cinétiques et cinématiques. Il fournit des informations sur le mouvement (*e.g.* trajectoire et modèle de force) dans le temps et, ce faisant, peut compléter ou même remplacer le *KR* dans certaines tâches. Par exemple, une rediffusion vidéo du mouvement d'un expert où un graphique force-temps peut montrer comment un mouvement s'est déroulé, et un expert peut utiliser cette information pour changer certains aspects du mouvement (OPPICI *et al.*, 2021).

De plus, ANDERSON *et al.* (2013) calculent l'erreur quadratique moyenne *RMSE* (*Root Mean Square Error*) à partir de la distance euclidienne entre le mouvement des apprenants et ceux des experts pour mesurer la similarité entre ces gestes. Le *RMSE* représente une mesure directe et précise de la capacité de l'apprenant à produire le geste cible selon les auteurs (ANDERSON *et al.*, 2013). Dans une simulation pour l'apprentissage de la menuiserie (*cf.* figure 3.9), les performances des apprenants ont été évaluées grâce à une comparaison entre la courbe d'apprentissage des compétences et celle des experts. Cette courbe d'apprentissage a été obtenue en passant par plusieurs traitements. D'abord, le système a enregistré des informations telles que la position de l'outil de travail, la pression vers le bas, l'absence de traces et de lames cassées, etc. À partir de ces données, le système calcule des métriques telles que la rectitude de la coupe, la vitesse de la coupe, la force appliquée vers le bas, la déviation de la marque de coupe, le nombre de lames cassées, l'inclinaison angulaire, le temps nécessaire, etc. (JOSE *et al.*, 2016).

Afin de permettre à des étudiants en médecine d'améliorer leurs compétences motrices en matière de salpingectomie laparoscopique en chirurgie gynécologique, LAMBLIN *et al.* (2020) évaluent le mouvement en observant les métriques telles que : le temps total de la procédure (seconde), la perte de sang (ml), le volume de réserve (volume de sang dans la cavité pelvienne à la fin de la procédure : ml), la durée de la diathermie ovarienne (seconde), la migration ou le mouvement latéral de l'instrument (cm) pour évaluer le nombre de fois où un instrument a quitté le champ de la caméra (LAMBLIN *et al.*, 2020). Dans un EVAH permettant d'assister en temps réel les opérateurs impliqués dans des procédures d'assemblage manuel, PILATI *et al.* (2020) utilisent le temps de cycle d'assemblage, la courbe d'apprentissage (LC), la pente ou le taux d'apprentissage (LR) afin d'évaluer les performances des apprenants. La courbe d'apprentissage peut être évaluée

FIGURE 3.9 – Simulation pour l'apprentissage de la menuiserie (JOSE *et al.*, 2016)

en considérant le pourcentage de diminution du temps moyen d'assemblage par unité, chaque fois que la production cumulée double (PILATI *et al.*, 2020). Dans le contexte du tai-chi, l'effet de l'apprentissage a été évalué par LIU *et al.* (2020b) en comparant les données de mouvement de chaque articulation du corps de l'apprenant à ceux des experts grâce à l'utilisation de la programmation dynamique. La programmation dynamique est un algorithme qui permet de mesurer la similarité entre deux séries temporelles (*i.e.* les données géométriques du mouvement) grâce à la distance euclidienne. Elle nous fournit un score indiquant que, plus les deux séries temporelles sont proches, plus le score est bas (LIU *et al.*, 2020b). Après analyse, nous avons constaté que cette méthode est similaire au *DTW* présenté dans la section 3.2 de ce chapitre. Dans un EVAH pour la formation à la dissection d'os utilisant des feedbacks haptiques, FANG *et al.* (2014) ont calculé les performances des apprenants en se basant sur le pourcentage du volume de l'os de référence retiré. Les erreurs techniques ont aussi été enregistrées par le système en déterminant le nombre de collisions de chaque sujet avec 6 structures anatomiques vitales.

COULAND (2020) a proposé une classification des métriques élémentaires dans les EIAH dédiés à l'apprentissage de geste. Les métriques élémentaires sont définies comme étant celles qui ne sont pas issues d'un calcul, d'une réinterprétation ou d'un ensemble de descripteurs « bas-niveau » du mouvement (LARBOULETTE *et al.*, 2015; MOREL, 2017). Cette classification a pour objectif de caractériser les métriques élémentaires du mouvement selon 7 propriétés (*i.e.* contigu, non-contigu, global, cinématique, géométrique, type

d'utilisation courante, connaissance scientifique nécessaire) afin de « mener à la création d'un système de conception et d'intégration de descripteurs de haut niveau, calculables à partir des descripteurs élémentaires proposés et interprétables par l'utilisateur en fonction du contexte et de ses connaissances » (COULAND, 2020). Néanmoins, cette classification consiste à lister des métriques de bas niveau et à les caractériser sans identifier des catégories faisant état de caractéristiques communes sur tout ou partie des métriques listées. Dans cette étude, nous proposons une classification dans l'optique de catégoriser l'ensemble des métriques utilisées dans les EVAH dédiés aux gestes et rencontrées jusqu'ici. La classification proposée étend la partie « bas-niveau » de la classification de LARBOULETTE *et al.* (2015) et nous permettra d'étudier dans la section suivante les feedbacks donnés aux apprenants en fonction de ces types de métriques. De plus, cette classification pourra apporter une aide dans la recherche et le choix des métriques selon l'EVAH à construire ou à adapter. Les différentes catégories que nous proposons sont non exclusives, il y en a au total 6, qui sont : cinématique, dynamique, géométrique, temporelle, quantité et occurrence, et score.

Catégories ● Cinématiques ● Dynamiques ● Géométriques ● Temporelles ● Quantités et Occurrences ● Scores ● N/A

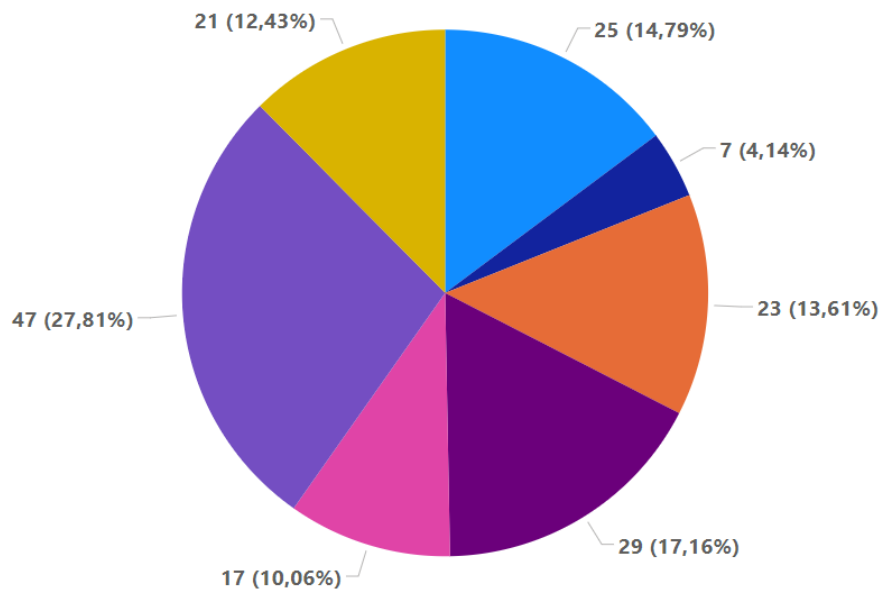


FIGURE 3.10 – Graphe des différentes catégories de métriques

La figure 3.10 présente le nombre d'articles utilisant les différentes catégories de métriques proposées. 21/103 articles n'utilisent pas de métriques, ce qui représente une minorité comparée aux articles utilisant des métriques (82/103), mais demeure non négligeable.

Les métriques géométriques déterminent les propriétés spatiales du mouvement (*e.g.* la distance entre deux entités). Les métriques cinématiques décrivent et caractérisent, quant à elles, le mouvement dans le temps et l'espace (*e.g.* vitesse, accélération, etc.). Ces deux catégories de métriques sont en général faciles à implémenter et à calculer, ce qui peut expliquer le fait qu'elles soient assez utilisées dans les différents domaines considérés (48). Certaines semblent plus connues et plus aisées à comprendre (*e.g.* vitesse, accélération, etc.) que d'autres (*e.g.* courbure, *jerk*¹) suivant les connaissances scientifiques et techniques des utilisateurs. Cependant, ces catégories de métriques nécessitent de déterminer des seuils d'acceptabilité afin d'évaluer les apprenants. De plus, présenter ces métriques sous forme de valeur brute n'est pas toujours compréhensible par les apprenants, c'est le vocabulaire métier de l'enseignant qui l'est (*e.g.* plus vite, moins vite, etc.). Ces valeurs nécessitent donc d'être interprétées en fonction de ce vocabulaire. Les métriques temporelles (29) sont celles qui évaluent le temps ou la durée par exemple d'une tâche ou d'une action réalisée durant la tâche. Ces métriques sont faciles à comprendre et à implémenter. L'objectif lié aux aspects temporels lors de l'apprentissage est en général de faire baisser un temps sans spécifier de seuil, ou d'effectuer une tâche en dessous d'un temps limite par exemple. Il convient, dans ce dernier cas de déterminer une valeur d'acceptabilité pour ce seuil. Les métriques dynamiques décrivent la cause du mouvement (*e.g.* la force exercée par un apprenant sur un objet). On constate qu'il y a très peu d'utilisation de ce type de métriques (7). Cela peut s'expliquer par le fait qu'elles nécessitent très souvent du matériel spécifique (*e.g.* des capteurs de pression) et sont exprimées dans des unités de mesure (*e.g.* la force en Newton, la pression en Pascal) dont les significations requièrent des connaissances scientifiques solides de la part des utilisateurs. Comme les métriques cinématiques et géométriques, les valeurs des métriques dynamiques doivent être adaptées au vocabulaire des experts en fonction de seuils d'acceptabilité prédéfinis. Les métriques appartenant à la catégorie « scores » sont les plus utilisées dans les EVAH dédiés aux gestes (47). Les scores sont faciles à comprendre (*e.g.* le score lié au vocabulaire expert (LISBOA *et al.*, 2016)), le principe reposant généralement sur le fait d'avoir le plus ou le moins de points possibles. Ces points correspondent au degré de qualité dans l'exécution de la tâche. Cependant, leur conception est très contextuelle et dépend de la tâche considérée et des besoins d'observations des experts. Tout comme certaines catégories de métriques susmentionnées, les scores nécessitent de déterminer des valeurs d'acceptabilité, qui sont en général produites de manière empirique par l'enseignant. De plus, dans un

1. représente le taux de variation de l'accélération du mouvement (LARBOULETTE *et al.*, 2015)

nombre de cas non négligeables, les scores ne permettent pas d'indiquer à l'apprenant, en première lecture, ce qui est à l'origine de sa bonne ou mauvaise performance, rendant plus difficile son amélioration (*e.g.* le score du DTW). Néanmoins, les scores permettent de représenter un ensemble d'observations en une unique valeur plus facilement interprétable pour l'utilisateur en termes de progression ou d'évaluation. Les métriques appartenant à la catégorie « quantité et occurrence » (17) ont pour objectif de représenter respectivement la quantité d'une entité (*e.g.* % de sang perdu) et le nombre d'occurrences d'un évènement (*e.g.* nombre de collisions entre un instrument chirurgical et un organe) dans une situation d'apprentissage. Ces métriques sont faciles à comprendre pour les apprenants et par rapport au score, leur implémentation est habituellement aisée sous réserve que l'évènement sous-jacent (*e.g.* une collision) soit facilement identifiable par le système. Cependant, mesurer des quantités dans les EV peut s'avérer difficile, car cette mesure dépend de la complexité de la représentation virtuelle (*e.g.* des voxels ou des shaders pour représenter un liquide, etc.) des éléments du monde réel impliqués dans la tâche. Le tableau 3.1 présente une synthèse des catégories de métriques étudiées ainsi que les travaux corrélés à ces catégories issues de notre étude bibliographique. Dans cette thèse, l'analyse bibliographique réalisée nous a permis de sélectionner un ensemble de métriques selon : (i) leur adaptation à différents contextes d'apprentissage et (ii) leur intégration du point de vue de la réingénierie. Ainsi, quelques métriques (*ex.* vitesse, jerk, temps d'une étape, etc.) appartenant aux différentes catégories géométriques, cinématiques, scores, temporelles, quantités et occurrences ont été implémentées (*cf.* chapitre 5). En effet, comme le montre le tableau 3.1, ces métriques sont simples à implémenter. En outre, elles sont utilisées dans la majorité des travaux analysés dans notre étude bibliographique et certaines (par exemple la vitesse) semblent compréhensibles par la plupart des utilisateurs. En plus d'évaluer les gestes des apprenants, des feedbacks spécifiques (augmentés) doivent être utilisés dans la plupart des cas afin de fournir une représentation interprétable des métriques d'évaluation, mais aussi pour corréliser leurs valeurs avec le vocabulaire métier de la situation et profiter des différentes modalités (*i.e.* visuelle, audio et haptique) de transmission des informations offertes par la RV. Dans la section suivante, nous analysons l'impact de ces feedbacks et leurs propriétés dans les EVAH dédiés à l'apprentissage de gestes.

Catégories	Descriptions	Interprétations	Matériels spécifiques	Implémentations	Articles
Géométriques	Déterminent les propriétés spatiales du mouvement (<i>e.g.</i> la distance entre deux entités), par exemple, l'évaluation de la distance de lancer d'une balle dans KOJIMA <i>et al.</i> (2014).	Partiellement facile	Non	Facile	7, 11, 14, 18, 22, 23, 24, 28, 33, 34, 37, 38, 40, 41, 43, 44, 50, 72, 71, 83, 89, 92, 93,
Cinématiques	Permettent de décrire l'évolution du mouvement dans le temps et l'espace (<i>e.g.</i> vitesse, accélération, etc). Elles sont directement liées aux données géométriques du mouvement. On a par exemple, l'utilisation de la vitesse d'une batte de <i>baseball</i> dans TAKAHASHI <i>et al.</i> (2019).	Partiellement facile	Non	Facile	7, 9, 12, 14, 24, 30, 33, 34, 40, 49, 53, 55, 59, 66, 72, 71, 76, 79, 88, 89, 90, 92, 93,
Dynamiques	Décrivent les causes ou les origines du mouvement (<i>e.g.</i> force, pression, etc), par exemple, la génération d'une force d'attraction pour contraindre le mouvement de l'apprenant (HIROAKI <i>et al.</i> , 2011).	Partiellement facile	Oui	Partiellement facile	11, 18, 21, 28, 34, 83, 88,
Scores	Représentent un ensemble de caractéristiques du mouvement, seul ou non, en une valeur. Dans le cadre de la thérapie (réhabilitation des fonctions), NGUYEN <i>et al.</i> (2010) génèrent des scores à partir du <i>rwLCSS (realtime weighted Longest Common Sub-Sequence)</i> , permettant aux patients d'évaluer leur progression de manière autonome. Le <i>rwLCSS</i> , une variante du DTW, prend en charge le décalage temporel et la correspondance de séquences de longueur inégale tout en ignorant les parties bruitées.	Facile	Non	Partiellement facile	3, 4, 6, 10, 11, 8, 9, 12, 17, 21, 22, 25, 26, 28, 29, 30, 32, 37, 39, 40, 43, 44, 46, 48, 47, 51, 53, 61, 56, 62, 63, 64, 66, 67, 70, 73, 75, 83, 85, 86, 89, 90, 91, 94,
Temporelles	Indiquent le temps de tout ou partie d'une action ou de la tâche à apprendre. Par exemple, le temps de fonctionnement et le temps cumulé des erreurs ont été utilisés dans BUESCHER <i>et al.</i> (2018).	Facile	Non	Facile	5, 7, 11, 9, 15, 22, 23, 52, 26, 32, 41, 42, 48, 49, 51, 54, 61, 59, 63, 65, 69, 70, 72, 76, 78, 79, 85, 89, 92,
Quantités & occurrences	Mesurent la quantité d'une substance, d'un élément ou comptent le nombre d'occurrences d'une action, d'un élément, etc. Par exemple, JIANG <i>et al.</i> (2016) ont compté le nombre de faux pas des apprenants.	Facile	Non	Partiellement facile	1, 13, 19, 20, 32, 40, 41, 42, 54, 63, 65, 67, 69, 70, 76, 79, 85,

TABLE 3.1 – Classification des métriques de l'étude bibliographique. Les numéros de la colonne "Articles" correspondent à des articles dont les références se trouvent dans le tableau en annexe A

3.4 Les feedbacks dans les EVAH dédiés aux gestes

3.4.1 Définitions et généralités

Une capacité intéressante des EVAH est de pouvoir fournir aux utilisateurs des retours d'information (*i.e.* feedbacks) appropriés selon plusieurs modalités (*i.e.* visuelle, audio et haptique), le tout en temps réel et en EV. HATTIE *et al.* (2007) définit le feedback comme une information fournie par un agent (*e.g.* un enseignant, un pair, un livre, un parent, soi-même, l'expérience) sur des aspects de la performance ou de la compréhension d'une personne, etc. SIGRIST *et al.* (2012) ont étudié les avantages et les limites des feedbacks (*i.e.* visuel, auditif, haptique et multimodal) augmentés pour améliorer l'apprentissage moteur en environnement réel et virtuel. Dans ce contexte, ils ont analysé les feedbacks délivrés en fonction de la complexité des tâches motrices considérées. La complexité des tâches considérées a été évaluée selon la définition de SHEA (2002). Cette définition indique que les tâches sont considérées comme complexes si elles ne peuvent généralement pas être maîtrisées en une seule session, avoir plusieurs degrés de liberté, et tendent à être écologiquement valides. Les tâches seront jugées simples si elles n'ont qu'un seul degré de liberté, peuvent être maîtrisées en une seule séance d'entraînement, et paraissent artificielles. SIGRIST *et al.* (2012) définissent les feedbacks augmentés comme étant des feedbacks extrinsèques, c'est-à-dire des informations qui ne peuvent être élaborées sans source externe ; ainsi, il est fourni par un entraîneur ou un *affichage*. Le terme *affichage* n'est pas limité à la modalité visuelle retranscrite au travers des écrans ou des projecteurs par exemple. Des écouteurs et des haut-parleurs sont également appelés *affichages* auditifs, et les robots peuvent agir comme des *affichages* haptiques. Les feedbacks augmentés peuvent établir un rapport entre la performance individuelle de l'apprenant et une performance souhaitée ou une instruction. Les instructions sont utilisées pour insister sur certains aspects du mouvement, pour rappeler des principes précédemment expliqués ou pour induire une certaine focalisation. La figure 3.11 présente les conclusions de leur analyse sur les différentes modalités de feedbacks. Le paragraphe suivant résume les arguments de l'article de SIGRIST *et al.* (2012).

Cette analyse (SIGRIST *et al.*, 2012) montre qu'il existe plusieurs stratégies pour fournir les feedbacks aux apprenants selon la complexité de la tâche. De manière générale, il faut adapter la quantité de feedback fourni et le contenu des informations délivrées selon la complexité de la tâche considérée. Les feedbacks visuels sont efficaces pour améliorer l'apprentissage des gestes. Néanmoins, selon la complexité de la tâche, il peut être nécessaire

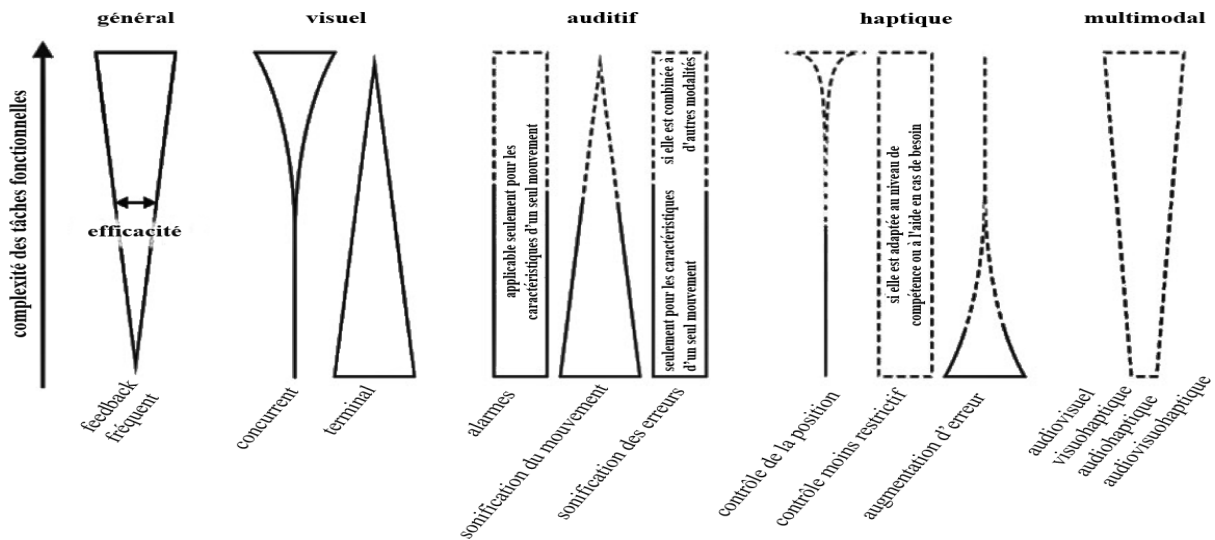


FIGURE 3.11 – Illustration du schéma de l'examen et résumé des principales conclusions des travaux de SIGRIST *et al.* (2012). La figure montre l'efficacité confirmée expérimentalement (trait continu) et les hypothèses (guidage et spécificité) formulées par SIGRIST *et al.* (2012) (en pointillés) sur l'efficacité d'une stratégie de feedback pour améliorer l'apprentissage moteur en fonction de la complexité de la tâche fonctionnelle. Plus la forme est large, plus la stratégie est efficace.

de fournir un nombre important de feedbacks à l'apprenant. De plus, il convient de gérer le nombre de feedbacks fournis selon le niveau de l'apprenant afin d'éviter une surcharge d'information. Cela montre que, en plus de l'information elle-même, la quantité d'informations à fournir est contextuelle à la situation d'apprentissage. Les feedbacks auditifs peuvent venir en soutien aux feedbacks visuels. Ces feedbacks auditifs : (a) sont facilement interprétable, permettent de (b) représenter des variations des propriétés biomécaniques et (c) des différences de niveau entre l'apprenant et l'expert. Les feedbacks visuels (changement des couleurs d'un objet, affichage de flèches, de consignes, etc.) et auditifs (alerte sonore indiquant une erreur, conseil vocal pré-enregistré) semblent faciles à mettre en place du point de vue de la réingénierie. Cependant, les variables codifiant ces mouvements ainsi que leurs seuils d'acceptabilités ne sont pas toujours connues. Les feedbacks haptiques sont particulièrement adaptés à la navigation et l'orientation de l'apprenant tout en réduisant la charge de travail des modalités visuelles et auditives. Cependant, du point de vue de la réingénierie, ces feedbacks nécessitent souvent des dispositifs haptiques qui sont en général, coûteux, et contextuelle à la tâche considérée. Fournir plusieurs modalités de feedbacks aux apprenants a des avantages sur l'amélioration dans l'acquisition des gestes si l'apprenant est en mesure d'intégrer des informations différentes réparties

sur chaque modalité. Il faut néanmoins mettre en place des stratégies dans lesquelles ces feedbacks ne représentent pas une charge cognitive supplémentaire pour l'apprenant. Pour prendre en compte ces différentes spécificités des feedbacks, nous allons dans la section suivante, à travers quelques exemples significatifs, analyser les pratiques les concernant ainsi que les conditions dans lesquelles ils sont fournis.

3.4.2 Exemples de feedbacks pédagogiques

Dans notre contexte, le terme feedback doit être compris comme l'ensemble des informations pédagogiques fournies par l'EVAH pendant, après la tâche et préalablement définies par un expert pour aider les apprenants à : (a) évaluer la tâche, (b) évaluer la progression dans la tâche ou (c) les guider dans la bonne exécution de la tâche. Par exemple, dans le cadre de l'apprentissage du tai-chi, LIU *et al.* (2020b) changent les couleurs de certaines articulations du corps (*cf.* figure 3.12) afin d'aider les utilisateurs à ajuster la position et l'angle de l'articulation concernée. *Vc* est le coach virtuel, et les articulations suivies sont marquées sur lui.

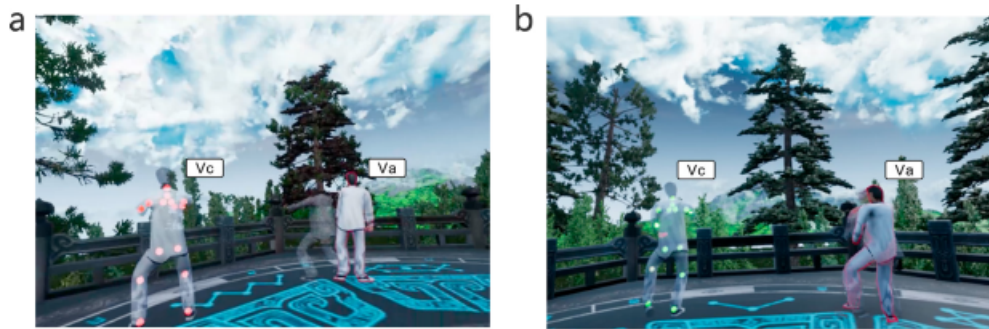


FIGURE 3.12 – Visualisation de feedbacks sur le corps (LIU *et al.*, 2020b)

Va est l'avatar de l'apprenant. Lorsque l'apprenant effectue une action, chaque articulation est affichée sur le *Vc*. Si le point de l'articulation est vert, cela signifie que le mouvement de l'articulation est proche du mouvement standard. Sinon, si le point de l'articulation est rouge, cela signifie qu'il y a un écart important entre le mouvement de l'articulation et le mouvement standard. En observant la position relative des deux, l'apprenant peut savoir comment ajuster la position et l'angle de l'articulation (LIU *et al.*, 2020b). Les feedbacks sont principalement utilisés pour guider et évaluer les apprenants. Ils sont également un élément clé pour les motiver et les engager dans l'activité. Pour apprendre à jongler, ADOLF *et al.* (2019), ont étudié l'impact du feedback visuel, haptique

et audio sur la motivation et l'engagement en fournissant la future trajectoire en 3D de la balle en mouvement et la force de la balle (représentée par l'intensité de la vibration). Les utilisateurs ont montré un meilleur engagement avec ces feedbacks (ADOLF *et al.*, 2019). Dans les travaux de MIZUYAMA (2010), un expert a utilisé une voix enregistrée et du texte visuel (*ex.* « ne bougez pas le poignet gauche », « poussez le contenu vers l'avant avec la louche », etc.) pour conseiller les apprenants dans la maîtrise d'un mouvement habile (*ex.* manipulation d'un *wok*) après chaque essai. CANNAVÒ *et al.* (2018) ont proposé un EVAH qui peut être utilisé comme un outil d'auto-apprentissage pour améliorer l'exécution des gestes de lancer au basketball. Ils fournissent trois types de feedbacks : un feedback visuel coloré pour indiquer, avec différentes couleurs, quand la position du corps est correcte, un score textuel qui évalue la performance globale et la possibilité de rejouer les mouvements au ralenti. Ces feedbacks sont utilisés pour permettre à l'utilisateur d'être guidé et d'auto-évalué sa performance pendant et après sa prestation (CANNAVÒ *et al.*, 2018).

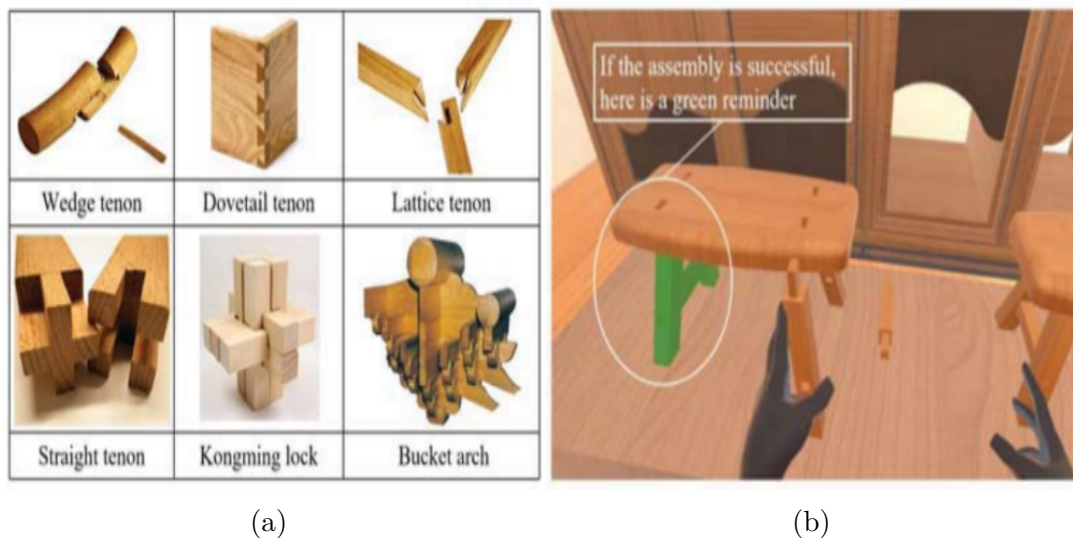


FIGURE 3.13 – (a) Différents types de tenons (b) Tenon en vert lorsqu'il est bien fixé par l'apprenant (CHEN *et al.*, 2019).

Dans leurs travaux, CHEN *et al.* (2019) ont utilisé un EVAH pour la formation à la structure de tenons (*cf.* figure 3.13 (a)) où ils ont fourni des feedbacks visuels et auditifs (*ex.* son de collision). Si l'assemblage de deux pièces est réussi, les contours des surfaces correspondantes de ces pièces deviennent verts pendant 2 secondes (*cf.* figure 3.13 (b)). Ils ont également fourni un son (une voie donnant des connaissances connexes) pour la

collision lorsque la main touche une partie du tenon. Dans ce contexte, ces feedbacks ont été fournis afin d'améliorer l'expérience utilisateur d'un point de vue pédagogique (CHEN *et al.*, 2019). Les feedbacks multimodaux (visuel, audio et haptique) de LUO *et al.* (2011) ont été conçus pour aider les utilisateurs à corriger leur mauvaise posture au yoga. Un instructeur de yoga donne un feedback audio (*ex.* « Bras gauche levé »). En même temps, les apprenants reçoivent des instructions visuelles affichées à l'écran qui comprennent un texte avec le même contenu que le feedback audio et des flèches rouges pointant vers les parties du corps mentionnées dans le feedback audio. Pour finir, ils utilisent des moteurs vibrants fixés sur les parties du corps pour générer des vibrations afin de corriger davantage la mauvaise posture de l'utilisateur.

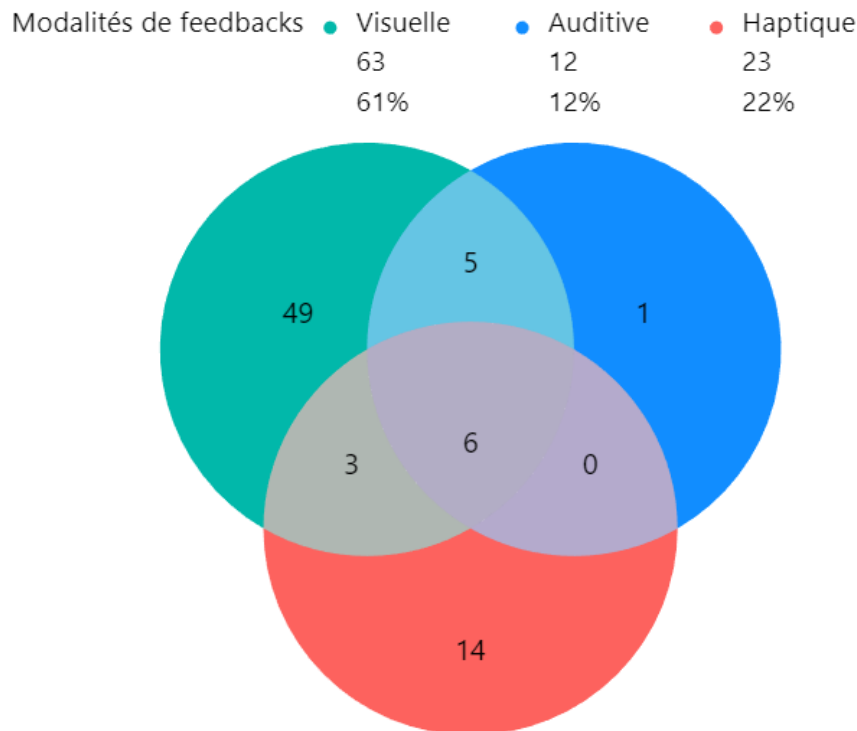


FIGURE 3.14 – Proportions d'articles utilisant les différentes modalités de feedbacks

La figure 3.14 présente les proportions d'articles utilisant les différentes modalités de feedbacks analysées. On constate que l'utilisation des feedbacks est répandue dans les pratiques des EVAH dédiés aux gestes, peu (25/103) articles n'utilise pas de feedbacks. La modalité visuelle est la plus utilisée (63). Cette tendance peut être due au fait que cette modalité de feedback s'est révélée être efficace en début d'apprentissage (SIGRIST *et al.*, 2012). Les feedbacks auditifs sont les moins utilisés (12). Ce constat peut s'expli-

quer par le fait que les tâches considérées dans ces travaux sont en général des tâches complexes. En effet, la plupart des études portant sur les feedbacks auditifs portent sur des tâches répétitives et rapides (SIGRIST *et al.*, 2012). D'autre part, les feedbacks auditifs nécessitent la création d'une base de données de voix pré-enregistrées et adaptées à la situation d'apprentissage. Au début de l'apprentissage, les feedbacks visuels concurrents ou terminaux fréquents ont été suggérés comme étant efficaces. Les feedbacks haptiques, bien qu'assez utilisés (23), dépendent des possibilités fonctionnelles des dispositifs haptiques pour délivrer l'information à l'apprenant. Il faut noter que le fait d'utiliser des feedbacks multimodaux arrive un peu plus souvent (14) que le fait d'utiliser des feedbacks auditifs uniquement (12). Cela peut être expliqué par l'aspect complémentaire de ce type de feedback décrit par SIGRIST *et al.* (2012). En outre, prendre en compte les pratiques et les besoins d'observations des enseignants nécessite de donner la possibilité à l'enseignant quant aux choix des modalités utilisées. Ainsi dans ces travaux, nous proposons un ensemble de feedbacks (visuel, auditif et haptique) rencontrés dans la majorité de la littérature tout en prenant en compte les aspects de réingénierie de ces feedbacks.

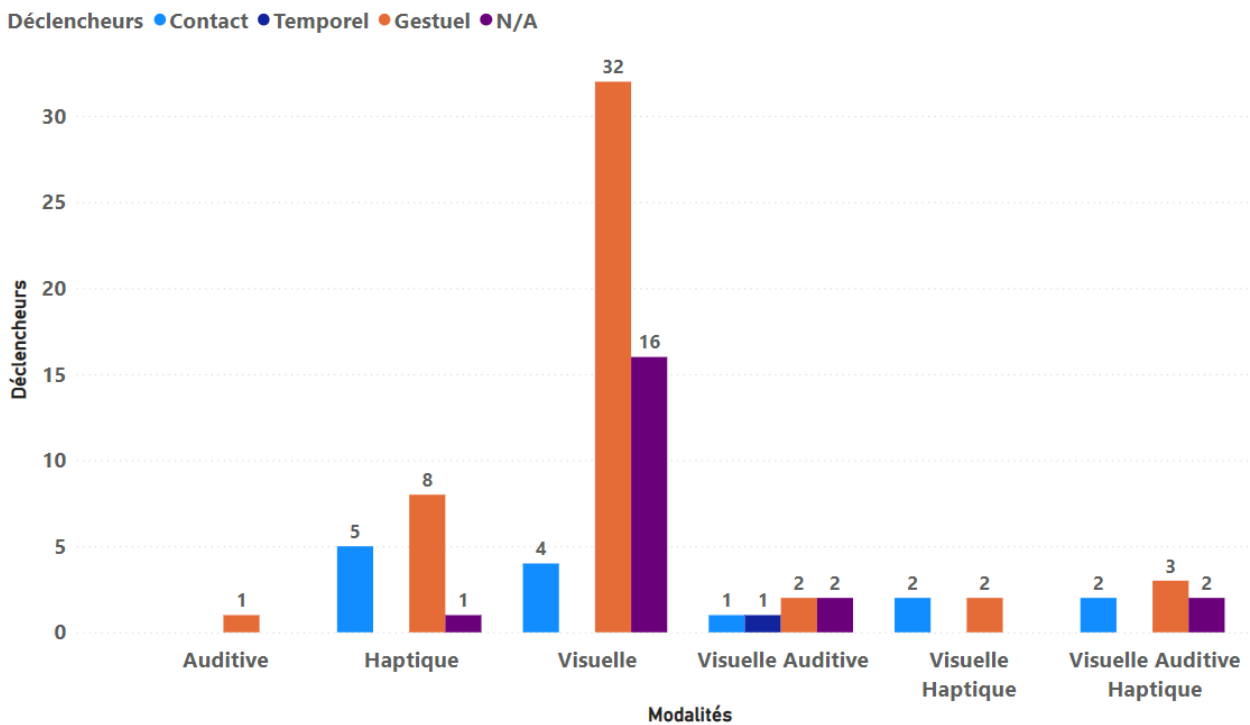


FIGURE 3.15 – Proportions de déclencheurs en fonction de différentes modalités de feedbacks

Les feedbacks s'activent selon des conditions particulières nommées « déclencheurs ».

Dans la suite de cette étude, nous tentons d'identifier les différents types de déclencheurs et leurs propriétés dans l'optique d'une réingénierie de ces derniers adaptés à notre contexte, c'est-à-dire la ré-exploitation des EV pour l'apprentissage de gestes. Sur l'ensemble des articles lus, nous avons identifié trois types de déclencheurs non exclusifs, à savoir les déclencheurs : (a) gestuels (liés aux métriques évaluant la qualité du geste, par exemple, la vitesse, l'accélération, la position dans l'espace, etc.), de contact (entre deux artefacts virtuels, cela permet, par exemple, d'identifier les séquences exécutées lors de la réalisation de gestes) et temporels (liés à la durée de la tâche ou d'une action de la tâche). La figure 3.15 présente le nombre de déclencheurs utilisés en fonction des modalités de feedbacks. On observe que les déclencheurs « gestuels » liés à la modalité visuelle sont les plus utilisés principalement en raison de l'objectif de la tâche d'apprentissage à savoir l'amélioration des compétences motrices. Néanmoins, on constate malheureusement que bon nombre d'articles (21) n'indiquent pas les conditions dans lesquelles ces feedbacks sont fournis dans les EVAH. Cela peut s'expliquer par le fait qu'il existe très peu de littérature sur cette notion dans le contexte de l'apprentissage de gestes. Les déclencheurs « de contact » et « temporels » demeurent pour leur part très peu utilisés (respectivement 14 et 1). On retrouve les déclencheurs de contact majoritairement dans les tâches séquentiellement décomposées à travers principalement les modalités visuelles (5) et haptiques (4). Elles sont en général utilisées pour donner des feedbacks aux apprenants lorsqu'une étape de la tâche est atteinte. Les déclencheurs temporels sont très peu utilisés pour donner des feedbacks (1). De plus, ce type de déclencheur est utilisé dans une tâche utilisant des feedbacks multimodaux (visuel et auditif). Les travaux utilisant les feedbacks multimodaux combinent ces derniers avec les différents types de déclencheurs présentés dans ces travaux sans que nous puissions pour le moment dégager une quelconque stratégie (*cf.* figure 3.15). Les déclencheurs s'avèrent ainsi utiles pour fournir des feedbacks aux apprenants, par exemple, pour éviter qu'un apprenant passe plus de temps que nécessaire sur une action donnée. Le tableau 3.2 présente quelques exemples de feedbacks, de déclencheurs, leurs propriétés et quelques travaux contextuels issus de notre étude bibliographique. Dans nos travaux, nous tentons de fournir aux enseignants des méthodes et outils leur permettant de mettre en place leurs situations d'apprentissage dédiées aux gestes à l'aide d'EVAH. Par conséquent, nous proposons plusieurs types de déclencheurs (gestuels, de contact et temporels) issus de notre analyse bibliographique. En outre, la mise en place de ces situations passe par l'utilisation de métriques et de feedbacks (incluant leurs déclencheurs) susceptibles d'évoluer dans le temps ou selon les besoins des enseignants. Ainsi, dans la section sui-

vante, nous étudions les aspects de réingénierie pour l'utilisation ou la réutilisation des EVAH ainsi que leurs métriques permettant d'analyser l'activité et les feedbacks donnant des informations pédagogiques aux apprenants en EV.

Types de feedback	Propriétés des feedbacks	Types de déclencheurs	Propriétés des déclencheurs	Exemples	Articles
Visuel	Couleurs et objets impactés	Gestuelles	Non précisé	Changer les couleurs de certaines articulations du corps dans l'optique d'évaluer la performance et guider l'utilisateur (OSHITA, 2019)	1, 2, 3, 4, 7, 10, 8, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 21, 25, 27, 28, 29, 30, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 53, 55, 61, 57, 60, 63, 64, 65, 68, 69, 70, 71, 73, 74, 77, 79, 80, 81, 82, 86, 87, 89, 90, 91,
Auditif	Conseils enregistrés	Gestuelles	Intervalles de métriques pour lesquels les conseils sont délivrés	Les erreurs sont signalées par l'assistant médical (personnage virtuel) pendant l'exécution de la procédure avec un retour audio. Une voix indique si l'apprenant va trop lentement ou trop vite lors de la compression et explique la bonne façon de positionner les mains (DEL BIMBO <i>et al.</i> , 2017)	14, 15, 16, 45, 48, 50, 55, 57, 69, 70, 79, 82,
Haptique	Non précisé	Contact	Objets virtuels impliqués (tissus, os et stylet à main)	Feedback haptique (<i>i.e.</i> retour de force), les apprenants peuvent sentir le changement de pression pendant le forage des os (FANG <i>et al.</i> , 2014)	1, 11, 19, 23, 28, 32, 33, 42, 50, 51, 54, 57, 58, 69, 70, 72, 73, 79, 82, 84, 85, 88, 94,

TABLE 3.2 – Exemples de feedbacks, déclencheurs et leurs propriétés utilisées dans divers contextes. Les numéros de la colonne "Articles" correspondent à des articles dont les références se trouvent dans le tableau en annexe A

3.5 Réingénierie des EVAH dédiés aux gestes

Plusieurs travaux de la littérature ont conçu des EVAH pour l'apprentissage de gestes. Généralement conçus spécifiquement pour une situation d'apprentissage donnée, ces EVAH sont de fait très contextuels à la tâche à apprendre et en conséquence peu réutilisables si la situation d'apprentissage évolue (c'est-à-dire, les besoins d'observations, la tâche, les pratiques pédagogiques, etc.). Ainsi, l'utilisation d'EVAH nécessite d'adapter les EV existants en fonctions des pratiques et besoins des enseignants. En outre, il existe plusieurs EV ou modèles 3D disponibles et accessibles gratuitement en ligne^{2 3 4}. Ces EV offrent une base à partir de laquelle, nous pensons qu'il est possible de mettre en place des situations informatisées dédiées à l'apprentissage de gestes assez rapidement. Cependant, ces EV ne possèdent pour la plupart que les fonctionnalités nécessaires pour simuler une situation réelle, sans élément éducatif (activités pédagogiques, feedbacks, etc.). Peu de travaux s'intéressent à la réutilisation, l'adaptation ou la contextualisation des EVAH dédiés aux gestes. Nous avons réalisé dans DJADJA *et al.* (2020), une analyse des EVAH orientés vers l'apprentissage de gestes selon : (i) leurs capacités à créer et évaluer de nouvelles tâches (ii), le type de traces analysées et (iii), le type de retours pédagogiques. Comme indiqué dans la section 3.2.2, trois grandes catégories se dégagent de cette analyse.

La première catégorie est celle des EVAH basés sur les procédures. Par exemple, dans cette catégorie, TOUSSAINT *et al.* (2015) ont analysé l'activité de l'apprenant, en termes d'action, pendant une opération chirurgicale simulée. Des traces hétérogènes, constituées de positions et orientations discrètes d'un trocart et de la direction du regard sur des dispositifs de surveillance, ont été enregistrées pour vérifier si certaines séquences ordonnées d'actions parallèles étaient correctement réalisées. Certaines propriétés génériques doivent néanmoins être ajoutées au modèle d'analyse des traces pour minimiser un processus de réingénierie lourd en cas de changement de la tâche ou d'évolution des besoins d'observation (BUCHE *et al.*, 2004). MAHDI *et al.* (2019) ont développé un éditeur permettant à tout enseignant de mettre en place son scénario d'apprentissage à partir d'EVAH existant. Un scénario était constitué d'actions définies par un ensemble de primitives d'interaction comportementale virtuelle (VBP) prédéfinies (*i.e.* observation, navigation, manipulation, communication) qui doivent être réalisées par l'apprenant. Une action consiste principalement à atteindre certains états discrets des objets manipulés. Malgré l'intégration du

2. Assetstore Unity

3. Unreal Engine Market

4. Blender Market

vocabulaire du domaine d'application, à travers des modèles sémantiques multicouches pour l'analyse des traces, l'enseignant ne peut pas, seul, intégrer de nouveaux besoins d'observation. De plus, les mouvements sous-jacents de l'utilisateur conduisant aux manipulations d'objets ne sont pas évalués conduisant à une perte d'information du point de vue des compétences motrices.

La seconde catégorie est celle des EVAH basés sur l'observation et l'imitation. De nombreux EVAH ont été développés pour capturer et jouer les mouvements de l'enseignant et de l'apprenant dans divers domaines d'application tels que le violon (NG *et al.*, 2007), les sports de ballon (MILES *et al.*, 2012), le lancer de disque (YAMAOKA *et al.*, 2013), le tir à l'arc japonais (YOSHINAGA *et al.*, 2015), le golf (KORA *et al.*, 2015), etc. Si l'on met de côté la chaîne de traitement complexe d'une session de capture de mouvements, tout enseignant peut potentiellement utiliser un système basé sur l'observation et l'imitation pour enregistrer un mouvement à apprendre. Cependant, la visualisation simultanée des mouvements de l'apprenant et de l'enseignant à des fins de comparaison est confrontée au défi de la synchronisation spatiale et temporelle de ces deux mouvements.

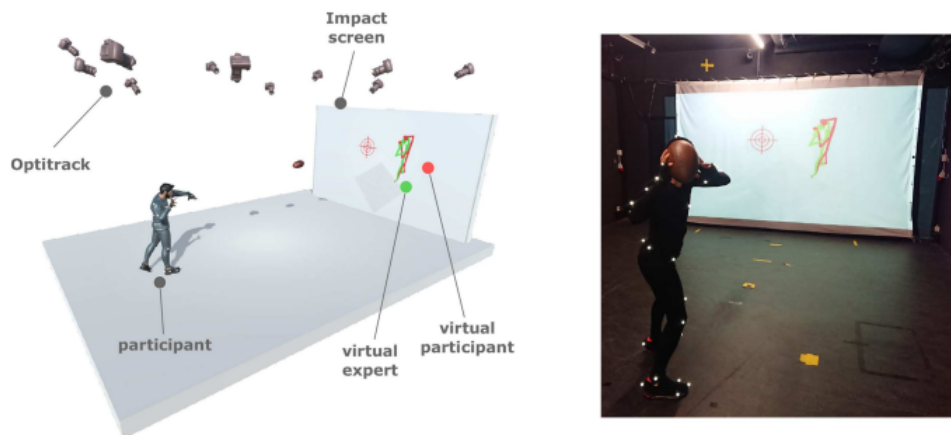


FIGURE 3.16 – Exemple d'apprentissage par observation et imitation dans le cadre du football américain (LE NAOUR *et al.*, 2019)

Le problème de la différence morphologique entre acteurs peut être en partie résolu par l'utilisation de représentations indépendantes de la morphologie (KULPA *et al.*, 2005 ; SIE *et al.*, 2014 ; MOREL *et al.*, 2016). En outre, des tentatives de mixage de plusieurs modèles experts, par “moyenne” afin d'avoir un modèle expert adapté (YOSHINAGA *et al.*, 2015 ; MOREL *et al.*, 2016) existent au détriment de la conservation des propriétés biomécaniques du mouvement tout comme avec les représentations « amorphologiques ». Mettre à l'échelle le squelette de l'apprenant en fonction de la taille de l'enseignant et

demander à ce dernier de suivre temporellement la démonstration de l'expert reste une solution non dénuée de défauts, mais acceptable, figure 3.16 (LE NAOUR *et al.*, 2019). Les cas d'utilisation concernent principalement des mouvements impliquant le corps (ou un sous-ensemble de ses membres et articulations) et non les objets manipulés. L'apprentissage par l'observation a cependant des limites sans un retour d'informations sur les caractéristiques clés des mouvements.

La dernière catégorie est celle des EVAH basés sur les caractéristiques clés des gestes à apprendre. Pour une situation d'apprentissage donnée, il n'existe généralement pas de mouvement unique et parfait à apprendre. Les caractéristiques cinématiques, dynamiques et/ou géométriques du mouvement (*e.g.* rapprocher les deux pieds puis pousser vers le haut pour un service précis au tennis) sont connues et l'apprenant doit construire son propre geste en respectant ces caractéristiques. Les EVAH construits sur ce principe peuvent calculer certains descripteurs cinématiques, dynamiques et géométriques à partir des séries temporelles constituées des positions et orientations des articulations (LARBOULETTE *et al.*, 2015). L'objectif principal est de : (i) comparer les valeurs des descripteurs avec des valeurs de référence et (ii) donner des conseils en fonction de ces valeurs. Ainsi, chaque besoin d'observation doit être traduit en un ou plusieurs descripteurs calculables. Par exemple, YAMAOKA *et al.* (2013) ont construit un EVAH pour apprendre le lancer de disques en donnant des feedbacks sur : (a) l'amplitude de la reprise, (b) la hauteur de la main droite, (c) la transition de hauteur de la main droite, (d) l'angle du coude droit et (e) la torsion de la taille. BALDOMINOS *et al.* (2015) ont travaillé sur la réhabilitation médicale à travers une simulation de gardien de but virtuel. Ils ont analysé certaines parties du corps (*i.e.* le coude, l'épaule et les bras doivent être droits et perpendiculaires au sol) pour arrêter le ballon. La stratégie d'évaluation exige, pour les utilisateurs finaux, des connaissances bien établies en mathématiques, physique et biomécanique pour interpréter correctement les valeurs des descripteurs. Pour résoudre ce problème, certains modèles d'analyse de traces peuvent donner une signification compréhensible aux descripteurs en fonction du vocabulaire du domaine d'application (TOUSSAINT *et al.*, 2015 ; BAUDOUIN *et al.*, 2007). Par exemple, l'analyse du mouvement de Laban (LMA), LABAN *et al.* (1988), a été utilisée par ARISTIDOU *et al.* (2015) pour décrire le mouvement selon ses quatre dimensions (*c.-à-d.* corps, forme, effort et espace) caractérisées chacune par un sous-ensemble de leurs descripteurs. Même si l'accessibilité des systèmes basés sur les caractéristiques clés peut être améliorée par l'intégration du vocabulaire expert, certains descripteurs de bas niveau (LARBOULETTE *et al.*, 2015) doivent, *in fine* être choisis pour chaque concept à évaluer.

Le choix de ces descripteurs rend souvent le système dépendant des tâches sans garantie sur son efficacité, même si l'expert était dans la boucle de conception (SENECAL *et al.*, 2018). Cela montre l'importance d'avoir des possibilités d'édition ou de ré-conception de l'EVAH considéré, en particulier pour les utilisateurs finaux afin de corriger des stratégies erronées d'analyse de l'activité. De plus, l'enseignant est habitué à son vocabulaire, pour corriger le mouvement et ce vocabulaire n'est pas forcément lié aux descripteurs choisis et à leurs valeurs.

Dans la plupart des travaux portant sur les EVAH dédiés aux gestes, le mouvement est évalué après son exécution (LEE *et al.*, 2018), selon une évaluation empirique ou l'utilisation de métriques dépendantes de la tâche caractérisant l'activité au niveau de l'action (réalisée ou non), ou en considérant la recherche d'une séquence ordonnée d'actions. Ces métriques représentent des observations sur l'évolution dans le temps des propriétés des OI. Pourtant, nous avons constaté que l'ensemble des artefacts virtuels interactifs ou parties du corps impliqués dans ces évaluations ne peuvent pas toujours être considérés comme des OI potentiels par les utilisateurs finaux. En outre, dans les travaux analysés, rien n'indique que les utilisateurs finaux peuvent modifier ou incorporer de nouvelles métriques ou feedbacks. Dans la plupart des cas, une fois l'EVAH conçu, on ne peut ni en ajouter de nouveau ni changer ceux qui sont utilisés. Leurs réutilisations nécessitent souvent des connaissances informatiques et des processus de codage lourds. De plus, il n'est pas possible d'ajouter, ou de modifier les règles de déclenchement des feedbacks fournis alors que ces règles peuvent évoluer en fonction de la stratégie pédagogique et des besoins d'observations des enseignants. Ainsi, un processus complet doit être mis en place afin de permettre aux enseignants de définir des situations d'apprentissages dédiés aux gestes, à partir d'un EV. Ce processus inclus la capture du mouvement (indépendamment du matériel de capture utilisé), la définition des métriques d'évaluation, des feedbacks à fournir à l'apprenant ainsi que des indicateurs à fournir à l'enseignant sur la tâche réalisée par l'apprenant. Ce processus doit s'adapter aux besoins d'observations, aux pratiques pédagogiques des enseignants et aux évolutions de la situation d'apprentissage. Du point de vue technique et scientifique, nous avons identifié à travers notre étude bibliographique un ensemble de verrous que nous avons tenté de lever dans ces travaux. En prenant en compte les besoins d'observations des enseignants, il s'agit de :

- décomposer de façon spatiale et temporelle l'ensemble de la tâche considérée dans les EVAH en une succession d'étapes constituées de séquences rejouables et évaluables (*Verrou 1*);

- importer n'importe quel EV afin de l'enrichir fonctionnellement (*Verrou 2*) ;
- décrire un modèle opérationnalisable permettant, à n'importe quel enseignant/expert, de formaliser un retour pédagogique en EV en fonction de ces pratiques pédagogiques c'est-à-dire, décrire : (a) ce qui sera mesuré ou évalué à partir de l'activité gestuelle (b), la représentation visuelle, audio ou haptique du retour à donner en EV en fonction de ces mesures et (c), les règles de déclenchement de ce retour (*Verrou 3*).

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé (i) les différentes significations que recouvre le terme « évaluation » dans le contexte des EVAH dédiés aux gestes, (ii) les Objets d'Intérêts (OI) (*i.e.* objets ou parties du corps) observés et impliqués lors du processus d'observation, d'analyse et d'évaluation, (iii) les différentes catégories de métriques utilisées pour ces évaluations, (iv) les différents types de feedbacks et de déclencheurs utilisés pour que l'apprenant puisse évaluer la tâche, sa progression dans la tâche ou pour être guidé dans la bonne exécution de celle-ci et (v) les aspects de réingénierie de ces EVAH. Dans la majorité des cas, l'évaluation des compétences et des performances des apprenants passe par des métriques calculées pendant ou après la réalisation de la tâche et basées sur trois notions importantes que sont : le temps (*e.g.* le temps d'une action), les séquences (*e.g.* atteindre une étape) et la qualité de ces gestes (*e.g.* la vitesse de la main). Pour ce faire, nous avons identifié un ensemble de métriques (cinématiques, géométriques, temporelles, scores, dynamiques, quantité et occurrence) permettant de quantifier plusieurs aspects de l'activité de l'apprenant lors de la réalisation de la tâche. De manière générale, il convient de déterminer des seuils d'acceptabilité de ces métriques afin d'évaluer les apprenants et utiliser ces métriques pour fournir via des déclencheurs adéquats des feedbacks adaptés au vocabulaire des experts. En effet, plusieurs modalités de feedbacks peuvent être utilisées pour donner des informations aux apprenants (visuelle, auditive et haptique). La plupart des EVAH étudiés ne permettent pas aux enseignants de créer, éditer ou supprimer les métriques et feedbacks associés dans les EVAH existants. Ainsi, dans l'optique de répondre et s'adapter aux besoins d'observations et aux stratégies pédagogiques des enseignants, il convient de mettre en place des systèmes permettant aux utilisateurs finaux de gérer : (i) les OI, (ii) les métriques d'évaluation et (iii) les feedbacks et leurs déclencheurs associés. Lors de notre étude bibliographique, nous avons identifié trois verrous

scientifique et technologique relatifs à : (a) la décomposition spatiale et temporelle en séquence rejouable et évaluable du mouvement, (b) la ré-exploitation des EV existants en vue de les enrichir fonctionnellement et (c) la conception d'un modèle opérationnalisable permettant, à n'importe quel enseignant/expert, de formaliser un retour pédagogique en EV. Le chapitre suivant présente une première contribution via un système permettant la mise en place de situations d'apprentissage basées « gestes » ainsi que l'évaluation de ces gestes au sein de n'importe quel EV. Le système proposé peut être utilisé sur des EVAH existants et nécessite peu ou pas de réingénierie en cas d'évolution de la tâche ou des besoins d'observations et d'analyse dans les limites définies par les fonctionnalités premières de la simulation virtuelle préalablement conçue et importée. Ce chapitre contribuera à lever les deux premiers verrous mentionnés dans ce chapitre. Le chapitre 5 tentera de lever le troisième verrou. En effet, dans ce chapitre, nous proposons un modèle de feedbacks pédagogiques adaptés aux gestes, prenant en compte les besoins d'observations et offrant à l'utilisateur la possibilité de modifier les propriétés de ces feedbacks et des métriques sous-jacentes qui analysent l'activité.

TROISIÈME PARTIE

Contributions

RÉINGÉNIERIE DES EV POUR L'APPRENTISSAGE DE GESTES

Dans le chapitre précédent, nous avons réalisé une étude bibliographique de la littérature parue depuis 2010 et relative aux EVAH dédiés à l'apprentissage de gestes et portant spécifiquement sur : (i) les évaluations réalisées, (ii) les métriques utilisées, (iii) les feedbacks et les déclencheurs ainsi que (iv) les aspects de re-ingénierie. Dans l'optique de permettre aux enseignants de mettre en place des situations d'apprentissage dans les EVAH dédiées aux gestes, nous avons identifié et étudié les catégories de métriques (cinématiques, dynamiques, scores, etc.), les types de feedbacks (visuel, auditif et haptique) et les déclencheurs (gestuels, de contacts et temporels) impliqués dans la mise en place de ces situations d'apprentissage. Avant de construire des situations d'apprentissage évaluable en Environnements Virtuels (EV) sur la base des éléments identifiés dans notre étude bibliographique, il est nécessaire de mettre en place des moyens permettant à l'enseignant de capturer, extraire et rejouer des mouvements en EV. La mise en place de ces moyens soulève des verrous technologiques et scientifiques que nous tenterons de lever dans ce chapitre. En prenant en considération les besoins d'observation et d'analyse des enseignants, les verrous identifiés sont les suivants :

- décomposer de façon spatiale et temporelle l'ensemble de la tâche considérée dans les EVAH en une succession d'étapes ou d'actions constituées de séquences rejouables et évaluables (*Verrou 1*) ;
- importer n'importe quel EV afin de l'enrichir fonctionnellement (*Verrou 2*).

L'objectif de ce chapitre est de (i) présenter le système développé afin de permettre aux enseignants/experts de mettre en place des situations d'apprentissage évaluable, dédiées aux gestes à partir d'EVAH existant et (ii) vérifier l'hypothèse suivante :

- la démonstration du geste à apprendre par l'enseignant et sa décomposition spatiale et temporelle en séquences, via le système MEVEL, permet d'atteindre les objectifs

des enseignants en termes de construction d'une situation évaluable (*Hypothèse 1*).

Dans la suite de ce manuscrit, on désignera par « utilisateurs finaux », les experts/enseignants mettant en place ces situations.

4.1 Motion Evaluation in Virtual Environment for Learning (MEVEL)

Dans cette section, nous présentons le système MEVEL (*Motion Evaluation in Virtual Environment for Learning*), créé pour assister les enseignants dans la mise en place de situations d'apprentissage dédiées aux gestes à partir d'EVAH existant. Grâce à MEVEL, les EVAH peuvent être enrichis afin d'aider les apprenants dans le processus d'apprentissage en offrant un rejeu des mouvements et la décomposition en étapes facilitant cet apprentissage. Plusieurs systèmes ont été conçus afin de favoriser l'apprentissage des gestes en EV (SHIM *et al.*, 2018 ; KEIME *et al.*, 2017). Cependant, ces systèmes sont en général orientés vers des tâches bien précises. De plus, l'analyse des EVAH adaptés à l'apprentissage de gestes réalisés dans le chapitre 3 nous indique que : (a) les Objets d'Intérêt (OI) sont figés *i.e.* l'utilisateur final ne peut modifier/choisir ses OI en fonction de ces besoins d'observations et (b) la possibilité de considérer le mouvement comme une séquence d'actions et/ou comme un ensemble de données géométriques n'est pas toujours offerte aux utilisateurs finaux. MEVEL tente d'apporter des éléments de réponses à ces manques en proposant une méthode permettant de décomposer spatialement et temporellement les situations d'apprentissage, puis d'extraire les MOuvements d'Intérêts (MOI) dans ces situations. Les MOI représentent l'évolution dans le temps et dans l'espace des OI résultant de l'activité de l'apprenant en EV.

4.1.1 Mise en place de situations d'apprentissage dédiées aux gestes

La mise en place de situations d'apprentissage dédiées aux gestes dans les EVAH nécessite de pouvoir extraire des informations sur les séquences exécutées ainsi que les mouvements réalisés par les apprenants dans ces EVAH. Pour répondre à cette problématique, nous avons proposé un processus opérationnalisé au sein du système MEVEL. La figure 4.1 décrit le fonctionnement de ce processus. Pour présenter son fonctionnement,

nous allons nous baser sur une tâche simple composée d'un verre avec une balle à l'intérieur, une zone de dépôt et un récipient (*cf.* figure 4.2, à gauche). Il s'agit pour l'apprenant d'apprendre à réaliser un ensemble d'actions, c'est à dire : (a) prendre le verre, (b) mettre la balle dans le récipient, (c) retourner le verre et (d) le déposer sur la zone de dépôt. Pour mettre en place ce processus dans un EV représentant une telle situation, cet EV sera importé au sein du système MEVEL (*cf.* figure 4.1 (a-b)).

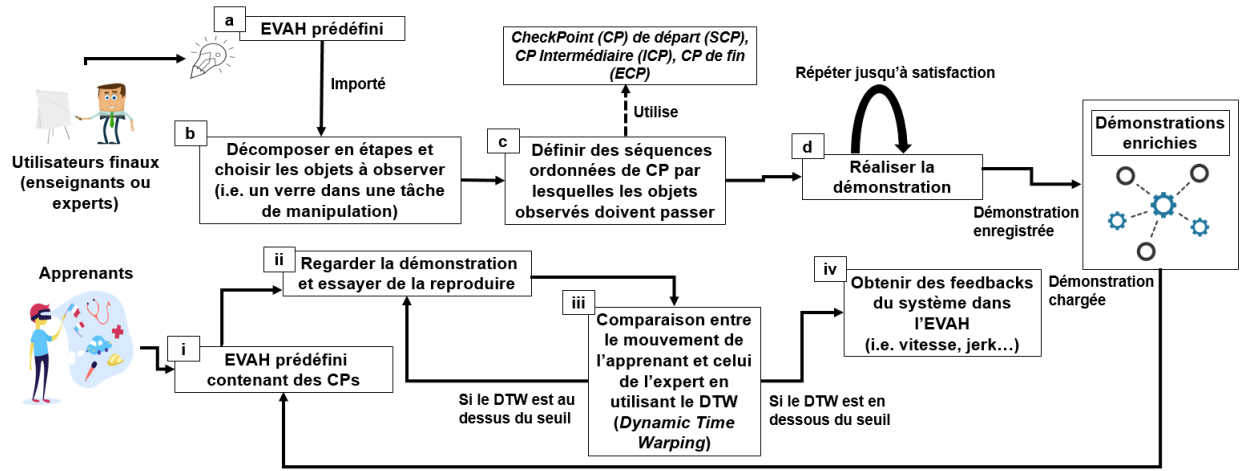


FIGURE 4.1 – Processus de mise en place d’une situation d’apprentissage dédiée aux gestes dans les EVAH

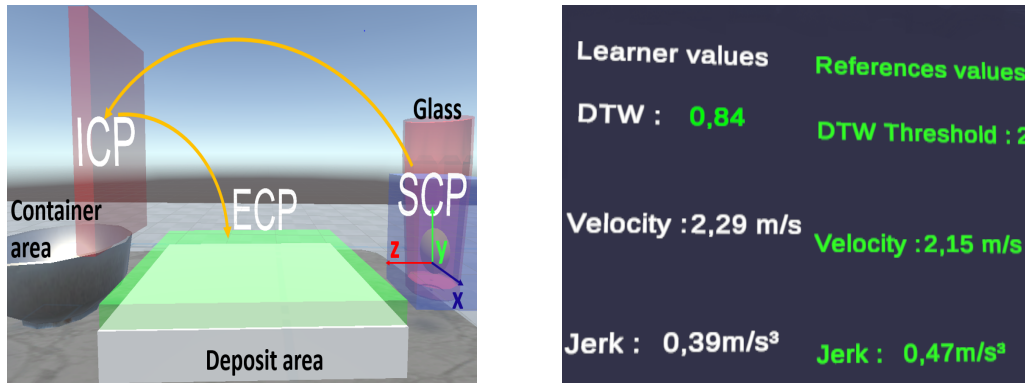


FIGURE 4.2 – (gauche) Tâche de manipulation du verre ; (droite) Affichage des métriques dans l'EVAH

Une fois l’importation réalisée, l’utilisateur final doit décomposer la situation d’apprentissage considérée en une ou plusieurs étapes ou actions en utilisant l’interface graphique proposée par MEVEL (*cf.* figure 4.1 (b)). Chacune de ces étapes est représentée par un objet 3D cylindrique visible uniquement par l’utilisateur final et lors de la configuration.

Pour chaque étape, l'utilisateur final doit : (i) choisir l'OI (*ex.* le verre ou la main de l'utilisateur) dont les mouvements seront analysés et (ii) créer et placer des *CheckPoints* (CP) virtuels 3D (*cf.* figure 4.1 (c)). Les CP sont des formes géométriques 3D (parallépipède rectangle ou sphère) qui peuvent être positionnées et dimensionnées dans l'espace 3D (leur fonctionnement est expliqué à la section suivante). Enfin, une fois ces configurations réalisées, l'enseignant fait une démonstration de la tâche, la visualise (*i.e.* visualiser les trajectoires des MOI et des objets virtuels impliqués), et répète la démonstration jusqu'à satisfaction (*cf.* figure 4.1 (d)). Les mouvements des OI considérés sont automatiquement enregistrés dans le système. Par la suite, l'apprenant visualise la démonstration de l'enseignant et la reproduit (*cf.* figure 4.1 (ii)). Les OI créés par l'utilisateur final doivent entrer en collision avec les CP lors de la réalisation de la tâche par l'apprenant, pour une double raison : (1) suivre la décomposition de la tâche (*ex.* prendre le verre, rapprocher le verre du conteneur afin d'y verser la balle et retourner le verre vide et le poser sur la zone de dépôt) et (2), extraire automatiquement les MOI. Ces MOI extraits permettent à MEVEL de calculer quelques métriques. À titre d'exemple, l'algorithme DTW est appliqué pour comparer la forme de la trajectoire des mouvements des OI manipulés par l'apprenant et l'enseignant. Pour rappel, le *DTW* permet d'obtenir une valeur unique qui indique la similarité entre deux signaux en termes de forme indépendamment de la durée (plus la valeur est faible, plus les deux signaux sont proches (MOREL *et al.*, 2016)). Le score du DTW obtenu par l'apprenant doit être inférieur à un seuil défini par l'enseignant (*cf.* figure 4.1 (iii) et figure 4.2, à droite). Si ce n'est pas le cas, l'apprenant doit reproduire à nouveau la démonstration (*cf.* figure 4.1 (ii)). Une fois le seuil atteint, certaines caractéristiques clés du mouvement sont affichées à l'apprenant telles que des métriques cinématiques (*ex.* vitesse et *jerk* (LARBOULETTE *et al.*, 2015)) pour avoir quelques caractéristiques sur les gestes réalisés (*cf.* figure 4.1 (iv) et figure 4.2, à droite). Cette stratégie, c'est-à-dire atteindre un seuil préalablement défini du DTW avant d'afficher ces caractéristiques a été conçue dans l'optique d'opérationnaliser une première preuve de concept et non pas de définir une méthode d'évaluation du mouvement. En termes de retour d'expérience, l'utilisateur peut visualiser au sein de l'EVAH : les CP mentionnés précédemment (ou non selon la stratégie pédagogique), les métriques ainsi que les trajectoires des mouvements effectués par l'expert et l'apprenant (*cf.* figure 4.2). En effet, la trajectoire est un indicateur bien connu permettant de guider l'apprenant dans son apprentissage et son évaluation (TERZIMAN *et al.*, 2011 ; CIRIO *et al.*, 2013), car considérée comme une information compréhensible, intuitive et pertinente pour l'évaluation de la performance actuelle du geste.

4.1.2 Extraction et évaluation des mouvements d'intérêt

Dans cette section, nous présentons la méthode, basée sur l'utilisation de CP et utilisée pour l'extraction automatique des MOuvements d'Intérêts (MOI) dans les EVAH dédiés aux gestes. Les MOI représentent l'évolution dans le temps des propriétés géométriques des OI résultant de l'activité de l'apprenant en EV. Pour rappel, les CP sont des formes géométriques 3D (parallélépipède rectangle ou sphère) qui peuvent être placées, pivotées et dimensionnées dans l'espace 3D. Trois types de CP peuvent être créés : le CP de départ (SCP), un ou plusieurs CP intermédiaires (ICP, facultatif) et le CP de fin (ECP). Les ICP permettent de délimiter des sous-séquences de l'étape à réaliser. Dans le cas de plusieurs CP intermédiaires, l'OI doit entrer en collision avec eux selon un ordre prédéfini. En outre, il faut noter que les CP peuvent avoir deux états : statique ou dynamique. Par défaut l'ensemble des CP ont des états statiques *i.e.* ils sont figés dans l'espace. Un CP dynamique est « attaché » à d'autres objets virtuels afin de suivre son déplacement. Un SCP possède son propre repère orthonormé local (*cf.* figure 4.2, à gauche) à partir duquel les positions et les orientations de l'OI observé sont calculées. À la création, un SCP ne peut être que statique. Un ICP ou un ECP peut être dynamique ou statique. Par ailleurs, l'enregistrement des données débute dès que l'OI entre en collision avec le SCP et se poursuit jusqu'à ce que l'OI atteigne l'ECP.

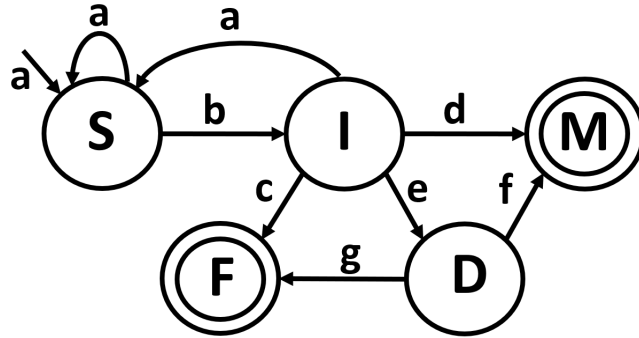


FIGURE 4.3 – Automate fini pour la démonstration de l'utilisateur final et l'évaluation de l'apprenant avec un ICP

Le fonctionnement du système des CP, avec un ICP, est représenté par la machine à états finis constituée des transitions suivantes (*cf.* figure 4.3) :

- a : collision avec le SCP, passage à l'état S *i.e.* les positions et orientations de l'OI sont enregistrées, l'enregistrement précédent est effacé s'il existe
- b : collision avec l'ICP, passage à l'état I représentant cette collision

- c : collision avec l'ICP, passage à l'état F, la démonstration de l'expert ou la tâche d'apprentissage échoue
- d (durant la démonstration de l'expert) : collision avec l'ECP, passage à l'état final M, l'enregistrement s'arrête, les métriques sont calculées et affichées dans l'EVAH
- e (durant la pratique de l'apprenant) : collision avec l'ECP, passage à l'état D, arrêt de l'enregistrement, l'activité de l'apprenant est comparée à celle de l'expert grâce au DTW
- f : la valeur DTW est inférieure ou égale au seuil, passage à l'état de fin M
- g : la valeur DTW est supérieure au seuil, passage à l'état de fin F

Pour résumer, lorsqu'un OI entre en collision avec un SCP, le système commence à enregistrer le mouvement. Si le CP suivant avec lequel l'OI entre en collision est le SCP, alors les données précédentes sont supprimées et le système commence à enregistrer un nouveau mouvement. Le système arrête l'enregistrement lorsque l'OI entre en collision avec l'ECP. Enfin, le système vérifie le respect de l'ordre des ICP. S'il est respecté, les données sont conservées. Dans le cas contraire, elles sont supprimées. Si on considère le verre comme OI dans l'exemple de la tâche de manipulation d'un verre (*cf.* section précédente), un SCP (parallélépipède rectangulaire) a été dimensionné et placé près du verre. De même, un ICP et un ECP rectangulaires ont été dimensionnés et placés respectivement à proximité du conteneur et au-dessus de la zone de dépôt (*cf.* figure 4.2). Une fois la configuration terminée, l'utilisateur final réalise plusieurs démonstrations et en choisit une comme exemple de la tâche à imiter. Enfin, l'apprenant essaie de reproduire la tâche. Le système enregistre alors les mouvements de l'apprenant. Ce dernier peut visualiser ses performances ainsi que ceux de l'enseignant. Néanmoins, lors de l'apprentissage, la forme de la trajectoire de l'apprenant ne correspondra pas nécessairement à la démonstration de l'utilisateur final. Par conséquent, le système compare la forme de la trajectoire du MOI de l'apprenant à celui de l'expert en utilisant le score du *DTW*. Si la valeur du score *DTW* est acceptable (en dessous d'un seuil défini par l'utilisateur final), l'apprenant peut comparer sa performance à celle de l'utilisateur final via les valeurs de métriques cinématiques, pour cet exemple, la vitesse et le *jerk* *i.e.* le taux de changement de l'accélération du mouvement. Plus la valeur du *jerk* est faible, plus le mouvement est fluide (figure 4.2, à droite) (LARBOULETTE *et al.*, 2015). Avec le processus proposé, nous espérons que les utilisateurs finaux pourront facilement construire une situation d'apprentissage en EV afin d'évaluer les activités des apprenants. Dans la section suivante, nous présentons les

interactions et l'architecture proposées pour permettre aux enseignants de construire leurs propres situations d'apprentissage en EV.

4.2 Interfaces, architecture et implémentation

L'objectif de MEVEL est d'assister le processus d'apprentissage et d'évaluation des gestes en enrichissant ces EVAH existants. Ainsi, cette section présente les IHM, l'architecture et l'implémentation de MEVEL afin que les utilisateurs puissent mettre en place des situations d'apprentissage évaluables dédiées aux gestes à partir d'EV existants et intégrés à MEVEL.

4.2.1 Interactions Humain-Machine (IHM)

Cette partie présente les interfaces graphiques (*cf.* figure 4.4) ainsi que les paradigmes d'interaction conçue pour : (a) choisir l'OI (b), créer et configurer les CP et (c), effectuer, jouer et enregistrer la démonstration. Les interfaces conçues ont été réalisées dans le contexte d'environnements virtuels à l'échelle 1 où l'utilisateur est immergé avec un casque de RV avec deux contrôleurs (manettes) permettant de capturer respectivement les mouvements de la tête et des mains. Les EVAH peuvent bénéficier de paradigmes d'interaction avancés, notamment ceux reposant sur des gestes pour offrir une interface plus naturelle avec des propriétés d'affordance (EMMA-OGBANGWO *et al.*, 2014). Les figures 4.4 (1 et 2) permettent à l'utilisateur d'importer et charger un EVAH à travers une interface 2D vers le système MEVEL. Une fois l'EVAH chargé, les utilisateurs sont immergés pour utiliser les interfaces virtuelles présentées dans les parties 3, 4 et 5 de la figure 4.4. Ces dernières prennent la forme d'un menu 2D et sont attachées à la main droite de l'utilisateur. Grâce à ces interfaces, l'utilisateur peut : (1) contrôler l'application (*i.e.* mode « choix d'OI », mode « création de CP », mode « démonstration ») et (2), accéder à l'ensemble des fonctionnalités utiles pour faire la démonstration (*i.e.* réinitialiser la scène virtuelle, jouer/mettre en pause/ralentir la démonstration en cours, etc.). L'utilisation conjointe d'un rayon virtuel et d'un bouton de commande du contrôleur de la main gauche permet d'interagir avec les boutons du menu. Le menu de la figure 4.4 (3), contient les boutons pour créer les étapes, les CP et choisir les OI. Lorsqu'une étape est créée, un objet cylindrique (contenant le numéro de l'étape) apparaît (*ex.* figure 4.5, à gauche). Les objets représentant ces étapes peuvent être : (a) déplacés dans l'espace en les

attrapant avec un contrôleur ou (b), supprimés et créés grâce au menu 2D virtuel. En ce qui concerne les OI, ces derniers sont choisis à l'aide d'un rayon virtuel pour la sélection et un bouton du menu 2D pour la validation. Cette interaction entraîne un changement de couleur de l'OI sélectionné.

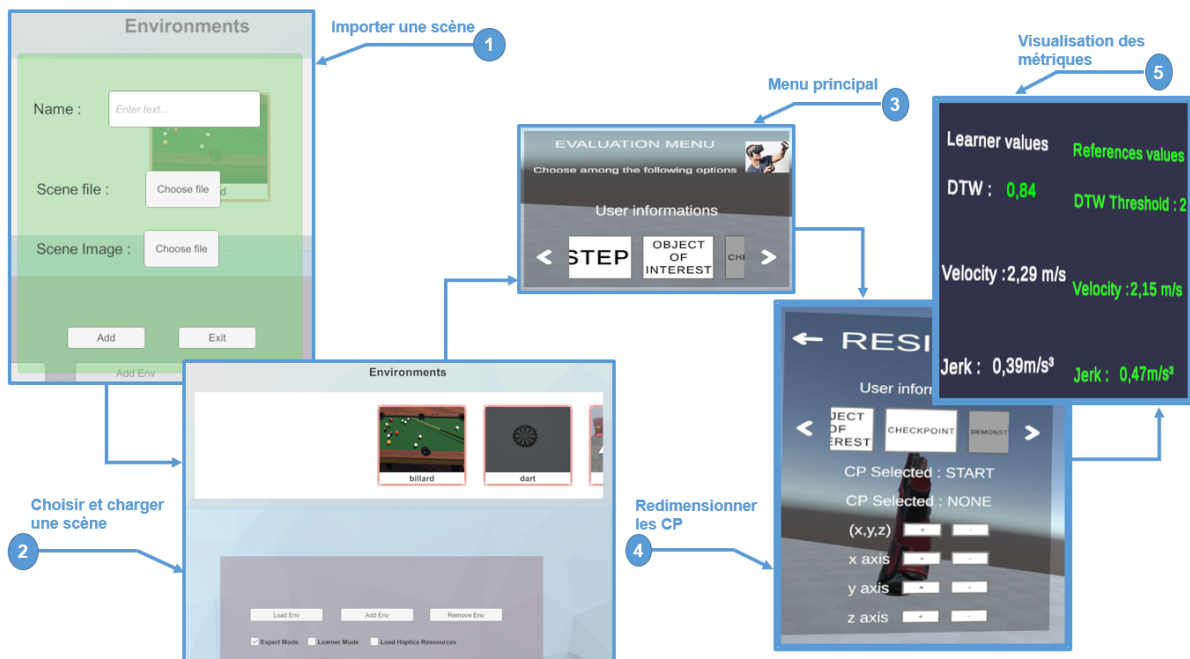


FIGURE 4.4 – Interfaces graphiques pour la mise en place d'une situation d'apprentissage dédiée aux gestes

Chaque objet 3D possédant un *rigidbody* ou partie du corps de l'utilisateur peut être choisi comme OI (figure 4.5, à gauche). Cependant, le choix des parties du corps se fait grâce à un menu listant toutes les parties disponibles (*i.e.* dont on peut suivre l'activité). Ceci est dû au fait que l'ensemble des parties du corps qu'on peut analyser dépend de l'interface de capture de mouvements utilisée. Les CP sont sélectionnés avec une interaction similaire à celle permettant de sélectionner les OI. La taille du CP peut être adaptée grâce à un menu 2D virtuel (*cf.* figure 4.4 (4)) avec des boutons permettant de diminuer ou augmenter cette taille selon les axes cartésiens 3D. Pour saisir un CP, il faut le toucher avec l'avatar virtuel de la main et maintenir un bouton du contrôleur enfoncé. Une fois les configurations (c'est-à-dire créer les étapes et les CP, puis choisir les OI pour chaque étape) des utilisateurs finaux réalisées, l'EVAH ainsi que les configurations des enseignants sont chargés et utilisés par les apprenants. Les apprenants peuvent ainsi visualiser les démonstrations (c'est-à-dire rejouer la tâche et visualiser les trajectoires des

MOI) des enseignants et tenter de les reproduire. La figure 4.5, à droite, présente le menu principal utilisé par l'apprenant.



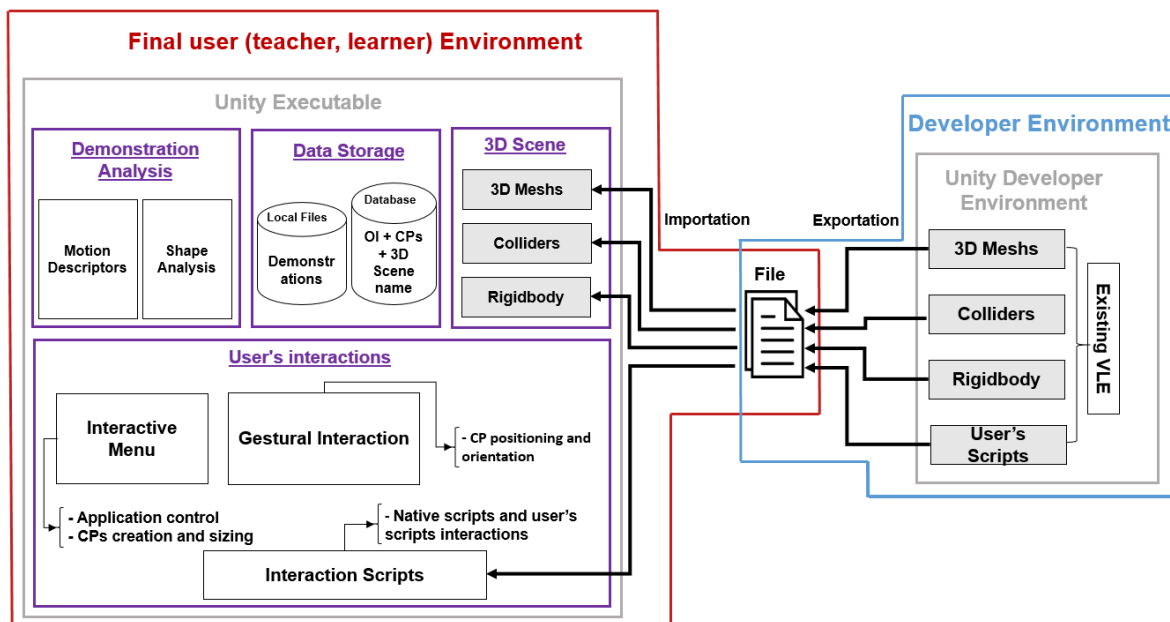
FIGURE 4.5 – (Gauche) Interaction de sélection des OI et une étape (contour vert) sélectionnée; (Droite) Menu principal de l'apprenant

Tout comme l'enseignant, grâce à un rayon virtuel, l'apprenant peut interagir avec le menu et rejouer la démonstration de l'enseignant, rejouer les actions d'une étape précise, réaliser et visualiser sa démonstration et visualiser par la suite les métriques issues de cette démonstration (figure 4.4 (5)). L'opérationnalisation du processus, des interfaces graphiques et des paradigmes d'interaction proposés sous la forme d'un module adaptable à n'importe quel EVAH existant soulève des défis techniques concernant l'architecture du système conçu. Ainsi dans la section suivante, nous décrivons du point de vue technique l'implémentation de MEVEL.

4.2.2 Intégration et traitement des EV

MEVEL a pour objectif d'être utilisé, à terme, par les utilisateurs finaux, non-informaticiens. De ce fait, il a été conçu afin de pouvoir intégrer et s'adapter à tout EVAH existant créé, pour le moment, avec *Unity* (version 2019). Le premier défi est relatif à la réutilisation des EV existants afin les enrichir du point de vue fonctionnel. Deux stratégies principales peuvent être envisagées pour construire un tel système. Le système peut être construit comme un plug-in d'*Unity*, qui peut être ajouté à n'importe quel type d'EVAH créé avec le même moteur. Le plug-in contiendra les fonctions liées à l'enregistrement, le jeu et l'analyse de la démonstration, aux interactions avec l'utilisateur ainsi qu'au stockage des données de la configuration de l'évaluation. L'EVAH pourra alors être modifié de façon native c'est-à-dire au sein du moteur *Unity*. Cependant, l'utilisation d'un plug-in requiert

des compétences minimales en informatique, ce qui va à l'encontre de l'utilisateur final visé dans cette thèse. Toutefois, il existe une deuxième solution, qui consiste à proposer une architecture permettant d'importer n'importe quel EVAH existant réalisé avec *Unity*¹ au sein de MEVEL (figure 4.6). Un EVAH réalisé avec *Unity* est principalement composé d'objets 3D (*meshes*) et de scripts permettant les interactions entre l'EVAH et l'utilisateur. Ces objets 3D possèdent généralement un *collider* et peuvent aussi avoir un *rigidbody* qui leur sont attachés. Le *collider* permet à l'objet 3D de détecter les collisions avec d'autres objets, tandis que le *rigidbody* permet à *Unity* de contrôler le mouvement de cet objet à l'aide d'un moteur de physique calculant l'évolution de la position et l'orientation de cet objet résultant des conséquences de la collision.

FIGURE 4.6 – Architecture du système *MEVEL*

Le concept principal de l'architecture proposée repose sur l'exportation de l'EVAH avec ses composants dans un fichier qui peut être importé et exploité par MEVEL. Suivant ce principe, l'enseignant doit exporter son EVAH (*cf.* figure 4.6, côté droit) puis l'importer au sein de MEVEL (*cf.* figure 4.6, côté gauche). L'opérationnalisation d'un EVAH au sein d'un autre système, avec *Unity*, nécessite de transformer ces EVAH en des “*assetbundle*”. Un *assetbundle* permet de sauvegarder un EVAH existant dans un seul fichier. Ce fichier contient « des actifs, non codés et spécifiques à une plateforme (tels que des modèles,

1. <https://unity.com/fr>

des textures, des prefabs, des clips audio et même des scènes entières) qu'*Unity* peut charger au moment de l'exécution »². Cette méthode permet d'exporter un EVAH et de le rendre opérationnel en l'important dans MEVEL. Cependant, cette méthode soulève trois problèmes importants :

- a) Un *assetbundle* ne contient pas les scripts d'interaction de l'utilisateur, à moins qu'ils ne soient précompilés. Cependant, dans ce dernier cas, l'information liant chaque script d'interaction aux objets concernés de la scène est perdue.
- b) L'EVAH, chargé à l'exécution, ne sauvegarde pas les modifications appliquées à la structure de la scène 3D. Par exemple, le changement de position d'un objet 3D et la création de nouveaux objets sont des informations perdues dès que l'EVAH est fermé.
- c) Des conflits peuvent survenir si les interactions de l'EVAH utilisent les mêmes entrées que celles de MEVEL.

Pour résoudre le problème (a), nous nous sommes intéressés au fait qu'on peut importer les scripts d'interaction avec les EVAH si ces scripts sont précompilés. Ainsi, nous avons mis en place deux algorithmes pour l'exportation et l'importation des EVAH. Pour l'exportation des EVAH, l'algorithme (i) identifie puis enregistre pour chaque objet de la scène les scripts qui lui sont associés, puis (ii) compile l'ensemble de ces scripts grâce au compilateur C# utilisé par *Unity*. À la fin de ce processus, on obtient un dossier contenant un *assetbundle*, un fichier CSV (contenant les informations liant les objets virtuels aux scripts d'interaction) et l'ensemble des scripts d'interaction compilés. Pour réaliser l'importation à partir de ce dossier, il faut charger l'*assetbundle*, puis associer chacun des scripts compilés aux objets virtuels grâce au fichier CSV obtenu lors de l'exportation. Une vidéo disponible en cliquant sur ce lien³ montre un exemple d'EV exporté et importé grâce à la méthode proposée. Concernant le problème (b), la destruction des objets virtuels à la fin de l'exécution du programme simulant l'EV implique la destruction des configurations (étapes, OI et CP) réalisées par l'utilisateur final. Par conséquent, pendant la simulation, nous sauvegardons au sein d'un fichier CSV les informations sur les étapes (numéro et position), les OI (identifiant et étape) et les CP (étape, forme, position, orientation et taille). Ainsi à partir de ce fichier, nous pouvons restaurer ces configurations une fois l'EVAH importé. En ce qui concerne le problème (c), les conflits d'interactions

2. <https://docs.unity3d.com/Manual/AssetBundlesIntro.html>

3. <https://lium-cloud.univ-lemans.fr/index.php/s/PHYAGRf2JG3sSXr>

ont été, pour le moment, résolus manuellement lorsque nécessaire. Nous reviendrons sur ce dernier problème dans les perspectives de ces travaux.

4.3 Traitements des données du mouvement

Cette section présente le matériel utilisé pour la capture du mouvement et les interactions avec MEVEL et les EV importés ainsi que les traitements effectués sur ces mouvements.

4.3.1 Matériel

Nous utilisons le HTC Vive (*cf.* figure 4.7) pour la capture des mouvements et pour immerger l'utilisateur au sein de l'EV. Le HTC Vive est composé d'un casque de RV (figure 4.7 (b), *head-mounted display (HMD)*), deux stations de base (figure 4.7 (a)) et deux contrôleurs (figure 4.7 (c)). Les stations de base sont dotées de lasers balayant de bas en haut et de gauche à droite ainsi que de capteurs de lumière qui permettent de déterminer l'emplacement du casque de RV et des contrôleurs. Il y a plus de 70 capteurs (*i.e.* accéléromètres, gyroscopes, etc.) dans le HMD et les contrôleurs du HTC Vive.

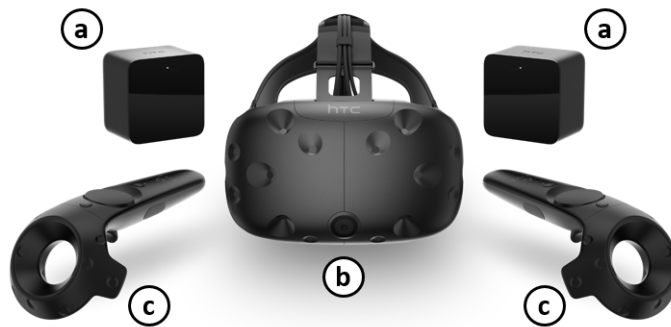


FIGURE 4.7 – HTC Vive

Ainsi, l'unité de mesure inertielle des stations de base peut effectuer le calcul de positionnement en fonction de l'accélération linéaire et la vitesse angulaire, puis corriger la position estimée en fonction de la position calculée à partir du balayage laser. Le casque HTC est associé à une unité centrale dotée d'un processeur *Intel Core i76700K* tournant à une fréquence de 4 GHz et une carte graphique NVIDIA GeForce GTX 1080.

4.3.2 Format des données

Les données des mouvements d'un OI sont enregistrées dans le format **Comma-Separated Values (CSV)**. Ces fichiers sont constitués de quatre informations, c'est à dire : (a) le temps entre chaque *frame* et le nombre de *frame*, (b) sa position (px, py, pz), sa rotation (rx, ry, rz) et le temps (*time*) et (c) le type de checkpoints (ctype) et l'étape (*step*) à laquelle le mouvement se produit. Deux types de fichiers sont générés après la réalisation d'une tâche. Le premier contient les coordonnées globales (*i.e.* en considérant le repère du monde virtuel pour les calculs des positions et des orientations) des objets virtuels qui se sont déplacés durant la tâche. Ces données permettent aux utilisateurs de rejouer la tâche réalisée ou celle des utilisateurs finaux, car elle concerne l'ensemble des objets virtuels ayant été en mouvement durant sa réalisation. Le deuxième type de fichier contient les coordonnées locales des OI observés. Dans ce cas, une information supplémentaire est enregistrée, il s'agit des coordonnées du nouveau repère (*cf.* section suivante). Cette information nous permet de passer d'un repère à un autre. Ces données sont utilisées pour le calcul de métriques pouvant être des indicateurs des performances des apprenants. La figure 4.8 présente un exemple d'une partie d'un fichier généré pour un objet virtuel 3D en mouvement. La méthode de calcul utilisé pour construire le deuxième type de fichier est présenté à l'annexe B.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	interFrameTime	0,0112683							
2	nbpoint	626							
3	px	py	pz	rx	ry	rz	time	cptype	step
4	3.926659	0.8983075	-2.503111	270	265.9607	0	0	NOC	0
5	3.926659	0.8983075	-2.503111	270	265.9607	0	0,0116234	NOC	0
6	3.926657	0.8983074	-2.50311	270	265.9662	0	0,0353711	NOC	0
7	3.926657	0.8983074	-2.50311	270	265.9661	0	0,0475635	NOC	0
8	3.926657	0.8983074	-2.50311	270	265.966	0	0,0591379	NOC	0
9	3.926658	0.8983075	-2.50311	270	265.9661	0	0,0709984	NOC	0
10	3.926657	0.8983075	-2.50311	270.028	265.9663	0	0,0824306	NOC	0

FIGURE 4.8 – Exemple de fichier contenant des données sur le mouvement

4.4 Expérimentation : étude du système MEVEL

Les méthodes et outils (*i.e.* le processus de construction d'une situation d'apprentissage évaluable, les paradigmes d'interactions et les interfaces) proposés doivent être validés du point de vue de l'enseignant et de l'apprenant. Notre objectif à travers cette première

expérimentation est de tester, du point de vue de l'expert/enseignant, l'utilisabilité et l'utilité du système MEVEL à travers trois situations d'apprentissage simples et connues, à savoir : le lancer de fléchettes, le tir au billard et l'écriture d'une lettre. Dans cette expérimentation, nous nous concentrons sur la création des CP, la réalisation et le rejou de la démonstration. En effet, les tâches considérées dans cette expérimentation sont des tâches simples dont les gestes à réaliser peuvent se faire sur une seule étape.

4.4.1 Protocole

Chacun des participants a reçu des explications à l'oral sur l'ensemble des concepts utilisés (étapes, OI et CP) et sur le fonctionnement de l'IHM, des feedbacks ainsi que leur rôle en tant qu'enseignant. En ce qui concerne les feedbacks, une explication a été fournie sur la signification des métriques utilisées comme, par exemple, le score DTW (*i.e.* plus le score est faible, plus les mouvements sont similaires) ou le *jerk* (*i.e.* représentant la fluidité/le tremblement du mouvement). Les participants ont visionné trois vidéos dans lesquels un utilisateur travaille en tant qu'enseignant sur trois tâches simples : la tâche de manipulation décrite dans la section 4.1 (*cf.* figure 4.2, à gauche), une tâche de navigation (*cf.* figure 4.9, à gauche) et une dernière montrant un lancer de balle dans un bac (*cf.* figure 4.9, à droite) (DJADJA *et al.*, 2019). Dans chacune de ces vidéos, l'enseignant choisit un OI dans l'EVAH, place les CP et effectue des démonstrations de la tâche jusqu'à ce qu'il soit satisfait⁴.

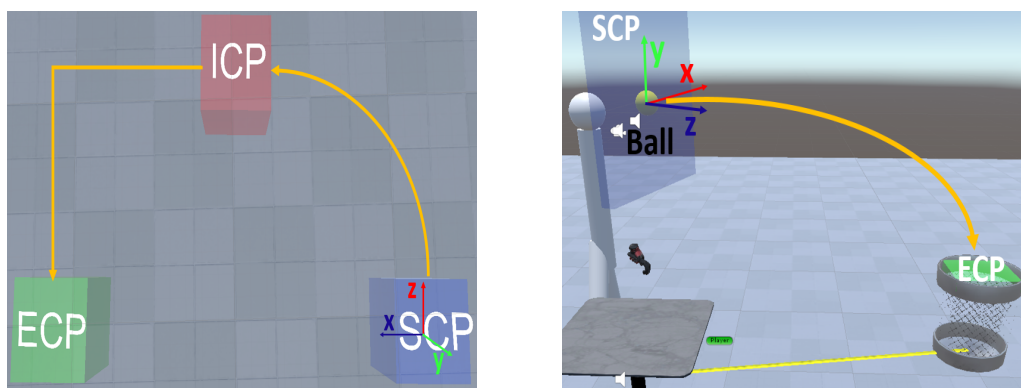


FIGURE 4.9 – (gauche) Tâche de navigation, vue du dessus, dans laquelle l'apprenant doit marcher du SCP au ECP en respectant les trajectoires ; (droite) Tâche de lancer de balles dans laquelle l'utilisateur doit lancer une balle dans la corbeille (DJADJA *et al.*, 2019)

4. <https://lium-cloud.univ-lemans.fr/index.php/s/MTWYt6pWa56mbEL>

Après avoir visionné les trois vidéos, le participant est invité à s'entraîner sur la tâche de manipulation du verre. Pour ce cela, il porte le casque de RV, prend les contrôleurs et construit la situation d'apprentissage évaluable (création et ré-dimension des CP et sélection des OI). Il réalise ensuite des démonstrations de la tâche. À ce stade, aucune donnée qualitative ou quantitative n'est enregistrée, car l'objectif est de se familiariser avec le système et appréhender les interactions proposées.

Par la suite, le participant est informé qu'il/elle jouera le rôle d'un enseignant sur trois tâches différentes de celles observées pour la pratique : un lancer d'une fléchette sur une cible, un tir au billard et l'écriture d'une lettre de l'alphabet. Pour chaque participant et chaque tâche, les données enregistrées sont : le temps entre le début de la simulation et la réalisation d'une démonstration que le participant considère comme satisfaisante, la configuration construite pour l'évaluation (*i.e.* l'OI choisi ainsi que la position, l'orientation et la taille des CP) et les démonstrations réalisées. Cette expérimentation n'est pas limitée dans le temps et l'utilisateur est libre de s'arrêter quand il le souhaite. Durant toute l'expérimentation, les participants reçoivent l'assistance technique nécessaire (*i.e.* rappel sur comment réaliser une interaction, réponses aux questions techniques qu'ils ont). Cependant, ils ne reçoivent aucune aide quant au choix des OI, de la configuration des CP ni pour la réalisation des démonstrations.



FIGURE 4.10 – (à gauche) Ligne de positionnement (rouge) de l'apprenant et cible dans la simulation de fléchettes, (au milieu) Boule blanche, boule orange et queue dans la simulation de billard, (à droite) Stylet virtuel, papier et bureau dans la simulation d'écriture

Les principaux objectifs de chacune des tâches considérées sont expliqués dans les paragraphes ci-dessous.

Lancer de fléchettes : l'objectif de cette tâche est de tester la méthode et les interactions proposées dans le contexte d'une tâche de lancer. Le jeu de fléchettes est une activité sportive qui demande de la précision. Le but de la simulation est de lancer une fléchette

au centre de la cible à partir d'une distance fixe. Tous les participants se placent juste avant la ligne rouge (*cf.* figure 4.10, à gauche). L'OI choisi peut être la fléchette ou la main de l'utilisateur.

Le tir au billard : l'objectif est de tester la méthode et les interactions proposées dans le contexte d'une tâche demandant de l'adresse. Le but de la simulation est de tirer la boule blanche avec la queue du billard, la boule blanche doit entrer en collision avec la boule orange placée près d'un trou (*cf.* figure 4.10, au milieu). La boule orange doit tomber dans le trou. La position de la boule blanche et de la boule orange est la même pour chaque participant. L'OI candidat peut être la boule blanche virtuelle, la boule orange, la queue du billard ou l'une des mains de l'utilisateur virtuel.

Écriture d'une lettre : l'objectif est de tester la méthode et les interactions proposées dans le contexte d'une tâche de manipulation avec un objet petit et plus précis que les simulations précédentes. Le but de la simulation est d'écrire la lettre "a" sur un papier virtuel posé sur un bureau (*cf.* figure 4.10, à droite). Quelques lignes horizontales sont tracées sur le papier. L'interface utilisée pour l'écriture est le bras haptique *Geomagic Touch*⁵. Le stylet physique de ce bras haptique a une représentation virtuelle dans l'EVAH en tant que stylo virtuel. Les contrôleurs du HTC Vive sont toujours utilisés pour définir la configuration de la situation et contrôler l'application. L'OI candidat peut être le stylet virtuel ou la main de l'utilisateur.

Après l'expérimentation, les participants remplissent un questionnaire dont les données sont anonymisées⁶. Les questions portent sur : la difficulté d'utilisation, le temps passé à réaliser les tâches, les menus virtuels et leurs interactions, les fonctionnalités du système MEVEL, les informations données par le système, l'appréciation sur la démonstration effectuée dans chaque tâche, etc.

4.4.2 Résultats

18 personnes, âgées de 20 à 30 ans, d'horizons différents (c'est-à-dire principalement des étudiants en informatique, commerce, biologie, avec ou non une expérience en RV) ont participé à cette expérience. Les séances d'entraînement ont été correctement réalisées par

5. <https://www.3dsystems.com/haptics-devices/touch>

6. <https://docs.google.com/forms/d/1KFfjDL8vTFRiKFy0aYlxY0yn0yKQaVU0f4MTEonZdJM/edit?usp=sharing>

tous les participants. Les participants ont tous réussi à réaliser des configurations pour les tâches de lancer de fléchettes et du tir au billard, excepté à l'étape de démonstration de la tâche de lancer de fléchettes (*cf.* section suivante). En outre, aucun d'entre eux n'a réussi à construire la situation pour la tâche d'écriture d'une lettre (*cf.* section 4.4.3). Certaines vidéos des configurations réalisées par les participants sont disponibles en suivant ce lien⁴.

4.4.2.1 Configurations réalisées

Lancer de fléchettes Dans cette tâche, 17 participants ont choisi la fléchette comme Objet d'Intérêt (OI) et un participant a choisi la main gauche. La façon dont les points de contrôle (CP) ont été placés varie d'un participant à un autre. La majorité des participants (15) ont donné de petites formes aux SCP (figure 4.11, a, b et d) tandis que 3 participants ont choisi de grandes formes (figure 4.11, c). Ce constat peut être dû au fait que la majorité des participants voulaient que les CP occupent uniquement la surface à travers laquelle l'OI passera, alors qu'une minorité a considéré la morphologie des apprenants en donnant de grandes formes aux CP. Le SCP (figure 4.11, couleur bleue) a été placé au niveau de la ligne rouge où les participants doivent lancer la fléchette.

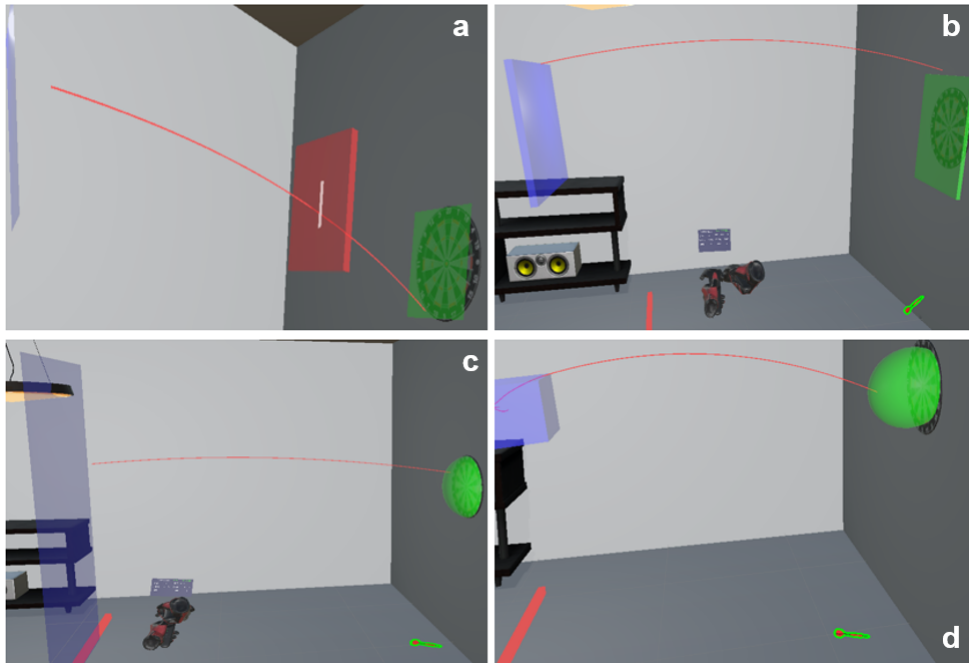


FIGURE 4.11 – Lancer de fléchettes : exemples de positionnement des CP et de la trajectoire de l'OI

5 participants ont utilisé un CP Intermédiaire (ICP), 4 ont utilisé deux ICP et 9 n'en

ont utilisé aucun. Les participants ont principalement utilisé un parallélépipède comme SCP (16). Cependant, 10 d'entre eux ont utilisé une sphère pour représenter le CP de fin (ECP). L'ECP (figure 4.11, couleur verte) a été placé juste devant la cible. 7 participants ont choisi des formes très précises pour les ECP afin de couvrir la surface de la cible. Tandis que 11 ont choisi des formes un peu plus grandes dans l'objectif probable de fournir des feedbacks aux apprenants même lorsque ces derniers manquaient la cible. La moitié des participants n'ont pas réussi à atteindre la cible avec la fléchette durant la phase de démonstration. La figure 4.11 montre quelques exemples de positionnement des CP et de la trajectoire générée par la fléchette lors de la démonstration.

Billard Plusieurs approches ont été adoptées par les participants pour le choix des OI. 7 participants ont choisi la boule orange comme OI et 9 ont choisi la boule blanche. L'un d'eux a choisi la queue de billard tandis qu'un autre a choisi la main droite comme OI. Il semble que le participant ayant choisi la queue de billard comme OI, voulait indiquer à l'apprenant la vitesse à avoir lorsqu'on tape la boule blanche. Pour ceux ayant choisi la boule blanche comme OI, ils semblent qu'ils ont essayé de montrer à l'apprenant où la tête de la queue de billard devait commencer et s'arrêter afin d'obtenir un effet lorsqu'on tape sur la boule blanche et ceux quelque soit la force appliquée. Le SCP (figure 4.12, couleur bleue), a été placé juste après et près de la boule blanche, tandis que l'ECP (figure 4.12, couleur verte) était placé après le SCP et non loin de la boule orange, tandis que l'ICP était placé entre le SCP et l'ECP. Tous les CP avaient de petites formes, probablement pour limiter les mouvements de l'apprenant dans le contexte d'une tâche qui nécessite de la précision. En outre, les formes des CP ont varié entre le parallélépipède et la sphère.

6 participants ont utilisé des ICP. Pour ces participants, l'ECP était proche ou fusionné avec la boule orange. Un des participants a donné une forme assez particulière à l'ICP c'est-à-dire une forme (parallélépipède rectangulaire) allant du SCP à l'ECP. Un autre a fusionné l'ICP avec la boule orange, puis a placé l'ECP après la boule orange, mais pas dans le trou dans lequel la boule orange doit tomber (figure 4.12, en haut à gauche). Pour ceux qui ont choisi la boule orange, le SCP a été placé juste après cette boule. Un ICP a été utilisé par un seul participant dans ce dernier contexte. Tous les participants ont réussi à réaliser une démonstration. La figure 4.12 montre quelques exemples de positionnement des CP et la trajectoire générée par l'OI choisi. L'ensemble de ces résultats seront analysés globalement dans la section 4.4.3.

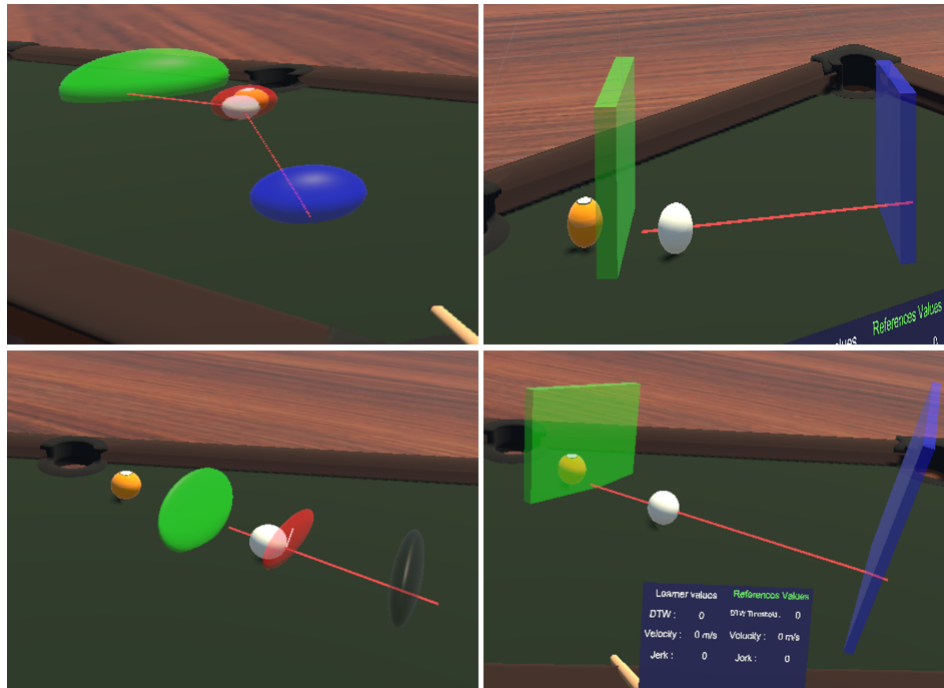


FIGURE 4.12 – Billard : exemples de positionnement des CP et de la trajectoire de l’OI

4.4.2.2 Temps pour effectuer une configuration satisfaisante

Lancer de fléchettes Le temps minimum pour réaliser une configuration a été de 4,53 minutes et le temps maximum a été de 16,56 minutes. Le temps moyen par utilisateur est de 7,7 minutes avec un écart type de 3,75.

Billard Le temps minimum a été de 4,36 minutes et le temps maximum 29,41. Le temps moyen par utilisateur est de 8,22 minutes avec un écart type de 5,74.

Les temps nécessaires pour effectuer ces configurations sont raisonnables, car seulement quelques minutes sont nécessaires pour mettre en place une configuration correcte pour les non-professionnels des deux domaines d’application considérés. Cependant, ces résultats dépendent fortement de la méthode et des interactions proposées dans cette étude.

4.4.2.3 Questionnaire

Le questionnaire (tableau 4.1) est composé de 7 questions basées sur une échelle de Likert de 1 à 5 à partir de la méthode décrite par LEWIS (1995).

	1	2	3	4	5. Sans opinion
1. Concernant la durée, j'ai effectué les tâches	Très lentement	Lentement	Rapidement	Très rapidement	
2. Apprendre à utiliser ce système était	Très difficile	Difficile	Facile	Très facile	
3. Utiliser ce système était	Très inconfortable	Inconfortable	Confortable	Très confortable	
4. Les menus virtuels étaient	Très mal positionné	mal positionné	Bien positionné	Très bien positionné	
5. Les informations fournies par le système sont	Très mal organisé	Mal organisé	Bien organisé	Très bien organisé	
6. Concernant la simulation de billard, votre démonstration était	Pas du tout satisfaisant	Non satisfaisant	Satisfaisant	Très satisfaisant	
7. Concernant la simulation de fléchettes, votre démonstration était	Pas du tout satisfaisant	Non satisfaisant	Satisfaisant	Très satisfaisant	

TABLE 4.1 – Questionnaire sur l'expérimentation du lancer de fléchettes, du tir au billard et de l'écriture d'une lettre

Les réponses aux questions proposent une appréciation de la méthode et des interactions proposées avec des adjectifs qualificatifs. Les réponses sont présentées dans la figure 4.13. Pour la clarté des résultats, la meilleure appréciation a été codée avec 4, tandis que la moins bonne appréciation a été codée avec 1. L'option « Sans opinion » est codée avec 5.

14 participants pensent avoir effectué leur démonstration lentement (question 1). La difficulté éprouvée pour le contrôle du système (question 2), l'utilisation générale du système (question 3) et l'appréciation de l'interface utilisateur (question 4 pour le menu et 5 pour la présentation des informations) ont été au moins satisfaisantes pour 14 utilisateurs. En outre, 6 participants ont suggéré quelques améliorations, notamment au niveau de l'interface utilisateur dans la partie commentaire du questionnaire. 14 des participants ont été satisfaits de leur démonstration dans la tâche de tir au billard (question 6) et 9

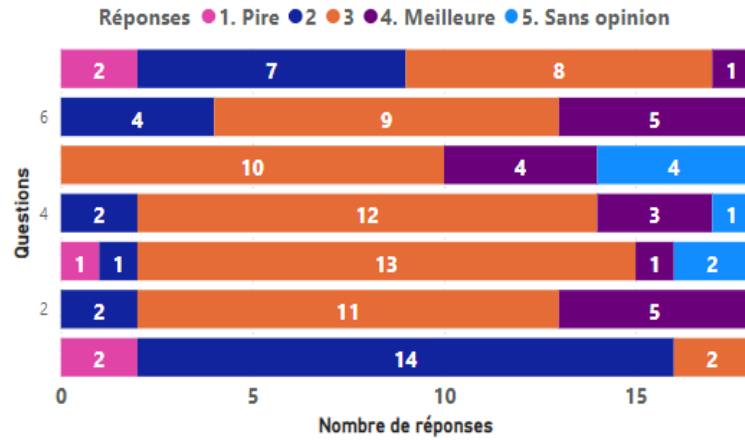


FIGURE 4.13 – Résultats des réponses des participants au questionnaire - de la pire (1) à la meilleure (4) appréciation, (5) sans opinion

participants dans la tâche de lancer de fléchettes (question 7).

4.4.3 Discussions

L’objectif de cette expérimentation est d’évaluer, du point de vue de l’utilisateur final (expert/enseignant), l’utilisabilité et l’utilité du processus de construction de situations d’apprentissage évaluables via la méthode et les interactions opérationnalisées au sein du système MEVEL. Pour cela l’hypothèse suivante a été formulée :

- la démonstration du geste à apprendre par l’enseignant et sa décomposition spatiale et temporelle en séquences, via le système MEVEL, permet d’atteindre les objectifs des enseignants en termes de construction d’une situation évaluable (*Hypothèse 1*).

Dans cette expérimentation, les participants ont construit des situations d’apprentissage évaluables, en choisissant, pour chaque tâche, un OI dont les mouvements seront analysés. Ensuite, les participants ont créé des séquences ordonnées de CP puis réalisé des démonstrations des tâches considérées. Une IHM basée sur des menus et des interactions gestuelles a été conçue pour assister les enseignants dans la mise en place de ces situations. Le système a été testé à travers trois tâches simples : le lancer de fléchette, le tir au billard et l’écriture d’une lettre. Les participants n’ont pas été en mesure de configurer correctement la tâche d’écriture, car ils ont eu des difficultés pour redimensionner, positionner et orienter avec précision des CP de très petites tailles nécessaires à la réalisation de la tâche. En ce qui concerne le processus de construction des situations d’apprentissages

évaluables, la plupart des participants ont choisi la fléchette comme OI dans la première tâche et plusieurs OI (boule orange ou blanche, queue de billard, mains) dans la tâche du tir au billard, la majorité étant consacrée aux boules de billard. Par conséquent, le choix des OI varie d'un participant à l'autre, en particulier pour les tâches comportant plus de deux objets pouvant être considérés comme des OI. La stratégie de configuration des CP varie également fortement, pour un même OI. Certains participants se sont intéressés à la précision de la tâche en positionnant finement les CP, tandis que d'autres ont utilisé plusieurs ICP en vue de décomposer avec plus de détails les tâches considérées afin de mieux assister l'apprenant. Un nombre acceptable de participants ont été satisfaits par leurs démonstrations sur les deux tâches (14/18 pour le tir au billard et 9/18 pour le lancer de fléchettes) réalisées en quelques minutes. Ceci tend à montrer : (i) l'utilisabilité de l'IHM pour construire des situations d'apprentissage évaluable à partir des OI, des CP et des démonstrations (ii), la nécessité de donner à l'enseignant des moyens pour construire ses propres situations d'apprentissage, car les besoins d'observations semblent être très différents pour chacun des participants. Ainsi, l'*Hypothèse 1* a été en partie confirmée, dans le contexte des conditions de cette expérimentation. Il faut cependant noter qu'un entretien aurait dû être mené pour comprendre, par exemple, ce qui explique le fait qu'en majorité les participants aient réalisé leurs configurations lentement (question 1), même si ce constat peut s'expliquer par le fait que les participants ont découvert pour la première fois les moyens proposés durant l'expérimentation. En outre, le fait que la moitié des participants n'ont pas été satisfaits de leurs démonstrations dans la tâche de lancer de fléchettes (question 7) est certainement dû à leurs performances, c'est-à-dire que ces participants ne sont pas parvenus à atteindre la cible.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthode, des interfaces et des paradigmes d'interaction afin d'assister les enseignants et les experts dans la mise en place de situations d'apprentissage évaluable dans les Environnements Virtuels pour l'Apprentissage Humain (EVAH). Ces propositions ont permis d'apporter des éléments de réponse à la question de recherche suivante :

- Quelles sont les méthodes permettant de créer des situations d'apprentissage décomposables et évaluable des gestes en EV ? (*Question 1*)

Les principes essentiels des moyens proposés et opérationnalisés au sein du système

MEVEL reposent sur la décomposition spatiale et temporelle de l'activité (en étape et avec les CP), puis le choix des Objets d'Intérêts (OI) dont les mouvements seront : (a) observés par l'apprenant suivant un apprentissage basé sur l'observation et l'imitation de la démonstration de l'enseignant (b), analysé par comparaison via l'affichage textuel de quelques caractéristiques géométriques, ou cinématiques (i.e. vitesse, *jerk* et DTW) dans l'EVAH. Dans ce contexte, l'hypothèse suivante a été formulée :

- la démonstration du geste à apprendre par l'enseignant et sa décomposition spatiale et temporelle en séquences, via le système MEVEL, permet d'atteindre les objectifs des enseignants en termes de construction d'une situation évaluable (*Hypothèse 1*).

Pour mettre en place le processus d'évaluation, une IHM gestuelle et basée sur des menus a été conçue pour permettre à l'enseignant de décomposer l'activité en étape et choisir les OI parmi les objets dynamiques disponibles dans l'EVAH. Ensuite, l'enseignant doit créer des CP, avec lesquels les OI doivent entrer en collision afin de définir les séquences d'une étape. Une architecture a été conçue pour rendre cette méthode opérationnelle grâce au système MEVEL qui peut être associé à n'importe quel EVAH existant. Une implémentation a été étudiée dans le contexte du moteur *Unity*. Ainsi, en prenant en compte les besoins d'observations des enseignants, les verrous suivants ont été totalement (*Verrou 1*) ou partiellement (*Verrou 4*) levés :

- décomposer de façon spatiale et temporelle l'ensemble de la tâche considérée dans les EVAH en une succession d'étapes constituées de séquences rejouables et évaluables (*Verrou 1*) ;
- importer n'importe quel EV afin de l'enrichir fonctionnellement (*Verrou 4*).

L'implémentation de l'architecture ainsi que la création d'un environnement permettant d'importer un EVAH existant a nécessité de lever les verrous scientifiques (1 et 2) à travers la méthode et les interactions proposées. Cependant, d'un point de vue technique, pour l'intégration d'EVAH existant au sein du système MEVEL, nous avons levé partiellement le verrou 2 grâce à l'importation des scripts d'interactions et la sauvegarde des configurations réalisées dans l'EVAH. Malgré quelques problèmes liés à la gestion des conflits entre les scripts d'interactions dans l'EVAH, la création d'un environnement permettant d'importer un EVAH existant au sein du système MEVEL, semble être le meilleur moyen, pour un utilisateur non-informaticien, de construire des situations d'apprentissage évaluables. Une expérience a été menée pour évaluer l'utilisabilité et l'expérience utilisateur du système MEVEL du point de vue de l'enseignant. Étant donné la

complexité (faible) des tâches considérées, la notion d'étape n'a pas été évaluée lors de cette expérimentation, car dans notre contexte, ces tâches contiennent chacune une étape. L'expérience a montré plusieurs résultats intéressants justifiant la pertinence de la méthode pour construire une situation évaluable basée geste en EV. La diversité du choix des OI et de la configuration des CP, combinée à la satisfaction de la majorité des participants, tend à démontrer la validité de la méthode proposée et ses capacités d'adaptation à différents besoins d'observation et différentes situations d'apprentissage. Ces résultats nous ont permis de confirmer, en partie, l'*Hypothèse 1*, car bien que l'expérience menée ait montré des résultats encourageants, plusieurs critiques et limites apparaissent et parmi elles, nous pouvons noter que les IHM proposées ne permettent pas de créer des CP de petite taille. Bien que les moyens proposés permettent la mise en place de situations d'apprentissage dédiées aux gestes ainsi que l'extraction et l'évaluation de ces gestes, très peu d'informations et de retours pédagogiques sont fournis aux apprenants. De plus, les métriques sous-jacentes à ces retours et caractérisant le mouvement offert par MEVEL ont été implémentées à titre d'exemple. Cependant, nous pouvons, à partir notamment de l'étude bibliographique réalisée dans le chapitre 3, compléter l'approche actuelle en mettant en place des moyens permettant à l'utilisateur final de gérer les métriques et les feedbacks utilisés en EV dans le cadre de l'apprentissage de gestes, en fonction de ses pratiques pédagogiques. En conséquence, le chapitre suivant propose un modèle descriptif de feedbacks pédagogiques orienté sur l'apprentissage de gestes en EV, ainsi que son opérationnalisation via l'outil GEFEEED utilisable par les enseignants et experts.

SUPPORT À LA CRÉATION DE FEEDBACKS PÉDAGOGIQUES ORIENTÉS GESTES EN EV

Dans le cadre de cette thèse, nous avons proposé au chapitre 4, une méthode permettant d’assister les utilisateurs finaux (enseignants/experts) dans la mise en place de situations d’apprentissage évaluables et dédiées aux gestes dans les EVAH existants via le système MEVEL. L’étude bibliographique réalisée dans le chapitre 3 nous indique que, dans la plupart des EVAH analysés, les feedbacks et les métriques permettant de guider et évaluer l’apprenant lors de la réalisation d’une tâche sont difficilement modifiables en cas de changement de la tâche ou d’évolution des besoins d’observation et des pratiques des enseignants. De manière générale, plusieurs types de feedbacks (visuelles, auditives et haptiques) et métriques (cinématiques, géométriques, scores, etc.) peuvent être utilisés pour donner des informations aux apprenants. De plus, il convient de déterminer des seuils d’acceptabilité de ces métriques afin : (a) d’évaluer les apprenants, et (b) de fournir via des déclencheurs adéquats les feedbacks adaptés selon les pratiques des experts. On note toutefois qu’un éditeur de feedbacks a été proposé dans le domaine de l’architecture par LO *et al.* (2019). Les auteurs ont proposé un système de création et d’édition de “déclencheurs d’actions” pour aider les utilisateurs finaux à gérer (ajouter, modifier, supprimer) leurs feedbacks. Cependant, la liste des actions et leurs déclencheurs possibles ne sont pas clairement établis. Notre objectif dans ce chapitre est de (i) présenter un modèle et son implémentation afin d’aider les utilisateurs finaux à créer rapidement leurs propres feedbacks, adaptés à l’évaluation et l’assistance de l’activité gestuelle, puis (ii) vérifier l’hypothèse suivante :

- l’opérationnalisation d’un modèle descriptif de feedbacks pédagogiques à 4 dimensions « artefact virtuel d’intérêts, métrique d’évaluation, déclencheur, feedback multimodal » *via* le système GEFEED permet aux enseignants d’atteindre leurs objectifs

en termes de retour pédagogique en EV (*Hypothèse 2*).

Les feedbacks implémentés peuvent appartenir aux modalités visuelles, auditives ou haptiques (vibrations), fournis en temps réel dans un EVAH en fonction des règles de déclenchement, caractérisant la dynamique globale des mouvements de l'activité des apprenants. La mise en place d'un système permettant aux enseignants de créer ces feedbacks et ces déclencheurs en prenant leurs besoins d'observations nécessite de lever le verrou suivant :

- décrire un modèle opérationnalisable permettant, à n'importe quel enseignant/expert, de formaliser un retour pédagogique en EV en fonction de ces pratiques pédagogiques c'est-à-dire, décrire : (a) ce qui sera mesuré ou évalué à partir de l'activité gestuelle (b), la représentation visuelle, audio ou haptique du retour à donner en EV en fonction de ces mesures et (c), les règles de déclenchement de ce retour (*Verrou 3*).

5.1 Modèle descriptif de feedbacks pédagogiques pour l'apprentissage de gestes en RV

Les feedbacks pédagogiques correspondent aux informations pédagogiques fournies par l'EVAH pendant ou après la tâche et préalablement définies par un expert pour aider les apprenants à guider et évaluer l'apprenant. Pour assister les utilisateurs finaux dans la gestion de ces feedbacks, il est nécessaire de proposer un système prenant en compte leurs besoins d'observation. Ce système doit opérationnaliser un modèle descriptif de ces feedbacks permettant à l'utilisateur final, de définir : (i) l'évènement déclencheur du feedback en lien avec un ou plusieurs OI, (ii) les conditions spatiales et/ou temporelles de déclenchement (iii), la modalité de transmission de l'information pédagogique (*i.e.* auditive, visuelle, haptique) et (iv) la représentation de l'information pédagogique transmise. La figure 5.1 présente le diagramme UML d'un modèle descriptif pour les feedbacks pédagogiques orientés vers l'apprentissage de gestes dans les EVAH. Ce modèle a été élaboré à partir des différentes conclusions de l'analyse bibliographique réalisée au chapitre 3. Ces conclusions sont rappelées progressivement dans ce chapitre.

Un feedback contient des données ayant, à minima, un nom et sa modalité (type) (*i.e.* visuelle, auditive ou haptique). Des données additionnelles (*ex.* OI, durée, couleur, etc.) variant en fonction du type de feedback peuvent y être ajoutées. La plupart des feedbacks

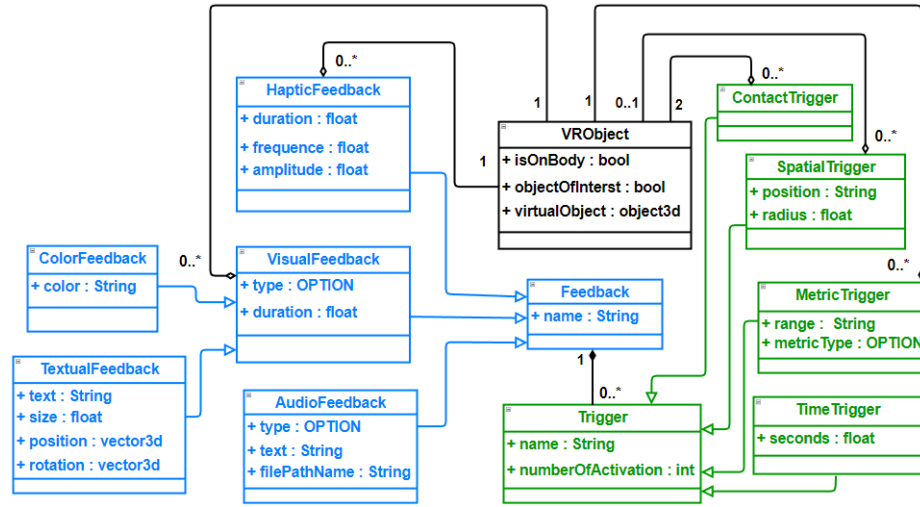


FIGURE 5.1 – Diagramme UML du modèle descriptif des feedbacks pédagogiques orientés vers l'apprentissage de gestes

vont survenir en fonction d'un « déclencheur » qui caractérise l'ensemble des propriétés biomécaniques qu'un objet virtuel doit respecter lors de la réalisation de la tâche (cf. figure 5.1, partie verte, *class* « Trigger »). Un feedback possède un ou plusieurs déclencheurs. Cependant, les déclencheurs ne peuvent activer qu'un seul feedback. La classe « VRObj » permet de représenter les OI *i.e.* parties du corps ou objets manipulés. Les déclencheurs utilisent cette classe pour, par exemple, identifier l'objet dont la vitesse sera analysée. Tandis que les feedbacks utilisent cette classe pour identifier le ou les objets sur lesquels ils s'appliquent lorsque cela est requis (*ex.* appliquer une couleur sur un verre manipulé). Nous avons mis en œuvre cinq types de feedbacks et quatre types de déclencheurs. Ces feedbacks et ces déclencheurs ainsi que leurs propriétés sont présentés respectivement dans les deux sous-sections suivantes. Ces propriétés correspondent à l'ensemble des éléments nécessaires à la création et la matérialisation de ces feedbacks (*ex.* la couleur à appliquer sur un objet) et de ces déclencheurs (*ex.* un seuil à atteindre d'une métrique utilisée pour montrer un feedback).

5.1.1 Les feedbacks

Nous avons implémenté des feedbacks pour les modalités visuelles, auditives et haptiques. Toutes les classes liées aux feedbacks sont identifiables dans la partie bleue de la figure 5.1. Ces trois modalités implémentées sont les modalités identifiées comme étant les plus utilisées dans les EVAH dédiés aux gestes (cf. chapitre 3 section 3.4). On distingue

deux types de feedbacks visuels : le formateur peut changer la couleur du contour d'un objet virtuel (*cf. class* « ColorVisual ») ou affiché du texte à un endroit précis ou « attaché » à un objet dans l'EV (*cf. class* « TextVisual »). Par exemple, il est possible de changer la couleur du contour d'une balle lorsque celle-ci atteint sa cible. Il existe plusieurs types de feedbacks visuels. Cependant, les deux feedbacks visuels implémentés dans ces travaux sont les plus utilisés à notre connaissance dans le contexte de l'apprentissage des gestes. Les feedbacks auditifs consistent à lire un fichier audio fourni par l'utilisateur ou générer une voix lisant un texte fourni. Dans ce dernier cas, le texte est converti en flux audio à partir de l'API Text-To-Speech¹ de *Microsoft*. Avec ces feedbacks, l'utilisateur peut par exemple informer l'apprenant sur le fait qu'une erreur a été commise et la manière de la corriger.

Feedbacks	Propriétés
Texte	Durée, contenu du texte, position, orientation, taille, 2D ou 3D, objet virtuel attaché (optionnel)
Contour coloré	Durée, couleur, objet virtuel attaché
Audio	Fichier audio ou contenu du texte
Haptique (vibration)	Durée, amplitude, fréquence, matériel haptique (<i>e.g.</i> contrôleur du HTC Vive)

TABLE 5.1 – Les feedbacks et leurs propriétés

En ce qui concerne les feedbacks « haptiques », leur implémentation dépend du dispositif matériel utilisé. Pour le moment, seule la « vibration » a été implémentée dans cette thèse. La vibration haptique implique la vibration du dispositif matériel compatible et spécifié (*ex.* les contrôleurs du dispositif VR HTC Vive), en définissant une durée, une amplitude et une fréquence. Par exemple, on peut faire vibrer les mains de l'apprenant lorsque celui-ci s'approche d'une zone dont il ne devrait pas. Le tableau 5.1 synthétise l'ensemble des feedbacks et leurs propriétés implémentées dans le cadre de ce travail.

5.1.2 Les déclencheurs

Les quatre déclencheurs mis en œuvre dans ce travail sont les déclencheurs dits « temporels », « de contact », « spatiaux » et « de type métrique ». Ces déclencheurs ont été choisis à partir des déclencheurs identifiés dans l'analyse bibliographique que nous avons

1. [https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/windows/desktop/ee125077\(v=vs.85\)](https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/windows/desktop/ee125077(v=vs.85))

réalisée dans le chapitre 3 section 3.4. Pour rappel, nous y avons identifié trois types de déclencheurs, principaux, non exclusifs, à savoir les déclencheurs : (a) gestuels (liés à des seuils à atteindre de métriques géométriques ou cinématiques du geste, par exemple, la vitesse, l'accélération, etc.), de contact (détectant les collisions afin, par exemple, d'identifier des séquences d'actions exécutées lors de la réalisation des gestes) et temporels (liés à la durée de la tâche ou d'une action). Tous les déclencheurs implémentés peuvent avoir lieu un nombre indéfiniment ou spécifique de fois, à travers leur propriété dite « d'activation ». Cette propriété permet de paramétrer le nombre de fois où le feedback sera lancé. Les déclencheurs peuvent être activés à des étapes précises de la tâche. L'utilisation de cette propriété est liée au système *MEVEL* présenté dans le chapitre 4 c'est-à-dire grâce aux *CheckPoints* et à la décomposition de la tâche à réaliser en plusieurs étapes. Grâce à cette décomposition, le système que nous proposons dans ce chapitre peut activer des déclencheurs sur des étapes précises de la tâche à apprendre. Le déclencheur « temporel » consiste à définir une durée au bout de laquelle le feedback apparaît. Il est possible à travers la propriété dite « d'activation » de configurer le nombre de fois où ce déclencheur va s'activer. On peut par exemple, informer l'apprenant lorsque le temps maximal de la réalisation d'une action est dépassé. Le déclencheur « de contact » consiste à démarrer le feedback lorsque deux objets virtuels, choisis au préalable, entrent en collision. Le déclencheur « spatial » est un déclencheur basé sur une métrique géométrique parmi deux métriques possibles : (i) la distance entre deux objets virtuels ou (ii) la distance entre un objet virtuel et une position globale de l'espace 3D. Ainsi, le déclencheur « spatial » peut être utilisé pour lancer un feedback lorsqu'un objet virtuel entre dans le rayon d'un autre objet virtuel par exemple. Le déclencheur « spatial » a été dissocié du déclencheur « métrique » pour des raisons liées à l'adaptation des IHM proposées, les propriétés de ce déclencheur étant plus nombreuses que celle des autres métriques. Le déclencheur « métrique » affiche le feedback auquel il est associé lorsque des valeurs ou des intervalles de valeurs d'acceptabilités des métriques associées et préalablement choisies sont respectés. Il est nécessaire de choisir une métrique parmi les suivantes : « horizontale », « verticale », « vitesse », « accélération », « jerk » et « DTW ». Pour rappel, le DTW vise à comparer la forme de deux séries temporelles sans tenir compte de l'aspect temporel (*i.e.* la durée ou la fréquence du signal) (MOREL *et al.*, 2016). Le DTW est utilisé dans notre cas pour comparer la forme du mouvement de l'expert avec celui de l'apprenant. Si la valeur du DTW est inférieure à un seuil prédéfini par l'utilisateur, le mouvement de l'apprenant est considéré comme proche de celui de l'enseignant. La métrique évaluant le fait qu'un objet

soit à l'horizontale ou à la verticale fonctionne en comparant l'orientation du repère de l'objet concerné au repère du monde virtuel. Pour qu'un objet soit considéré comme à l'horizontale, il faut que l'axe y du repère local de cet objet fasse un angle de 90° ou -90° avec l'axe y du repère du monde virtuel alors que cet angle sera de 0° ou 180° si l'objet est à la verticale. Les valeurs d'acceptabilité de ces métriques se basent sur les écarts liés aux valeurs de ces angles. Par exemple, si l'écart entre ces angles est de $\pm [0^\circ, 2^\circ[$ alors le geste peut être considéré comme « bon », « moyen » si l'écart est de $\pm [2^\circ, 4^\circ[$ et « mauvais » sinon. Une fois la métrique, son seuil ou ses intervalles définis, l'utilisateur final choisit l'OI dont le mouvement sera analysé *via* la métrique sélectionnée. Les métriques « horizontale et verticale » seront activées lorsque l'OI défini sera respectivement à l'horizontale ou la verticale dans l'espace virtuel. Ces deux métriques sont issues de la mise en place de l'EVAH pour la dilution de suspension en microbiologie décrit à la section 5.2.1. La vitesse, l'accélération et le *jerk* sont issus des travaux de LARBOULETTE *et al.* (2015). Leurs seuils peuvent être définis en utilisant des intervalles. Par exemple, l'enseignant peut activer un feedback lorsque le geste de l'apprenant est brusque (*i.e.* accélération élevée) ou lorsque les gestes des apprenants ne sont pas fluides (*i.e.* *jerk* élevé). Le déclencheur « spatial » ou « métrique » sera activé si l'OI défini atteint des valeurs (seuils) d'acceptabilités préalablement définies. Le tableau 5.2 reprend tous les déclencheurs et leurs propriétés implémentés dans ce travail.

Types	Objets virtuels	Métriques	Valeurs d'acceptabilités	Propriétés communes
Temporel		x	x	Étape (relatif aux étapes de la tâche), nombre d'activation
Contact	x			
Spatial	x	x	x	
Métriques	x	x	x	

TABLE 5.2 – Les déclencheurs et leurs propriétés

5.1.3 Instance du modèle au format JSON

Le modèle descriptif proposé a été implémenté et chaque feedback (incluant l'OI et les déclencheurs associés) peut être décrit à l'aide du format JSON. La figure 5.2 montre un exemple d'une telle structure avec deux feedbacks.

Le premier feedback (en rouge) utilise la modalité « haptique » (vibration) appliquée à la main gauche pour une durée d'une seconde, avec une amplitude (10 Pa) et une

```

{"feedbackJson":[
  {
    "name":"New Feedback",
    "type":"HapticFeedback",
    "feedbackSettings":"leftHand;1;10;10",
    "triggerJson":[
      {
        "name":"New Trigger",
        "type":"SpatialTrigger",
        "activation":"-1",
        "step":"",
        "triggerSettings":"0,3;True;(TestTubeColoredrDrGmCbC,False);True;(HeatSource1rDrGmC,False)"}
    ]
  },
  {
    "name":"New Feedback (1)",
    "type":"VisualFeedback",
    "feedbackSettings":"(BothHand,True);1;Color;red",
    "triggerJson":[
      {
        "name":"New Trigger",
        "type":"ContactTrigger",
        "activation":"-1",
        "step":"",
        "triggerSettings":"(LeftHand,True);(RightHand,True)"}
    ]
  }
]

```

FIGURE 5.2 – Exemple de deux feedbacks (haptique et visuel) avec deux déclencheurs (spatial et de contact) décrits dans le format JSON

fréquence (10 Hz). Le déclencheur associé est « spatial » et s’active indéfiniment (-1) lorsque les objets virtuels (“TestTube” et “HeatSource”) se trouvent à proximité l’un de l’autre dans un rayon de 0,3 mètre. Le second feedback (en vert) est « visuel ». Un contour rouge est montré sur les deux mains pour une durée d’une seconde. Ce feedback est lié à un déclencheur « de type contact » qui s’active indéfiniment (-1) lorsque les mains gauche et droite entrent en collision.

5.2 *GEstural FEedback EDitor (GEFEED)*

Dans cette section, nous présentons le système GEFEED (*GEstural FEedback EDitor*). GEFEED est un système permettant d’assister l’enseignant dans la création de feedbacks pédagogiques dédiés aux gestes dans les EVAH existants. Avec le système GEFEED, les enseignants peuvent, selon leurs besoins d’observation, créer des feedbacks pédagogiques associés à des déclencheurs utilisés pour guider ou évaluer les apprenants dans la réalisation de leurs tâches. Nous décrivons dans la section suivante l’EVAH considéré pour décrire le fonctionnement de GEFEED, puis son architecture et son implémentation. En-

fin, nous présentons quelques exemples détaillés de l'utilisation du système GEFEED *via* son IHM.

5.2.1 Situation d'apprentissage : dilution d'une suspension en microbiologie

Pour illustrer l'utilisation de notre système, nous avons mis en place un EVAH pour l'apprentissage de la dilution d'une suspension en microbiologie (*cf.* figure 5.3). Cet EVAH a été conçu en collaboration avec deux enseignants en biologie de l'IUT de Laval.

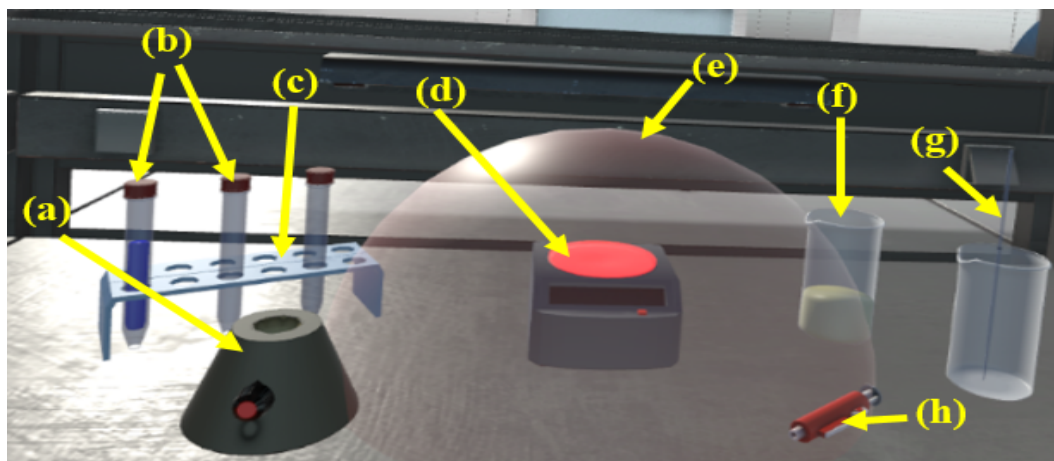


FIGURE 5.3 – Un EVAH pour l'apprentissage de la dilution d'une suspension de microbiologie

La dilution est l'action d'ajouter un liquide à une solution en vue de baisser la concentration de cette solution. En microbiologie, de par la variété des solutions dangereuses ou instables manipulées en laboratoire, le processus de dilution est une tâche complexe qui implique un ensemble de gestes précis et bien définis suivant un protocole strict, pour éviter tout danger notamment. Dans l'EVAH mis en place, l'utilisateur peut apprendre à effectuer une dilution complète. Pour pouvoir réaliser une dilution, en microbiologie, il faut à minima :

- un outil (*i.e.* un vortex) pour homogénéiser les différentes solutions (figure 5.3 (a)),
- deux tubes à essai (figure 5.3) c'est-à-dire, un tube à essai contenant la solution à diluer, en bleu et un autre avec le liquide dans laquelle la dilution sera réalisée,
- un portoir sur lequel poser les tubes à essai (figure 5.3 (c)),

- une source de chaleur électrique (remplaçable par un bec benzène) pour stériliser l'entrée des tubes à essai (figure 5.3 (d)),
- une pipette pour prélever une partie de la solution dans le premier tube à essai et la mettre dans le second rempli d'eau par exemple (figure 5.3 (g)),
- une pro-pipette à fixer sur la pipette afin de réaliser le prélèvement par aspiration (figure 5.3 (h)),
- un récipient utilisé pour ranger la pipette après son utilisation (figure 5.3 (f)).

Pendant la dilution, les mains de l'utilisateur doivent rester à une distance raisonnable (ni trop loin, ni trop prêt) de la zone stérile *i.e.* l'espace autour de la source de chaleur électrique (figure 5.3 (e)). La section suivante détaille les principales caractéristiques du système proposé, son architecture et ses fonctionnalités.

5.2.2 Architecture et implémentation

La figure 5.4 montre une représentation de l'architecture proposée. Cette architecture utilise la fonction d'intégration d'EV (du système MEVEL) présentée au chapitre 4 section 4.2.2. Pour rappel, cette fonction permet d'importer un EV au sein d'un système. Ainsi, cet EV peut être enrichi avec de nouvelles fonctionnalités. L'architecture proposée a été implémentée avec la version 2019 de Unity. Elle se compose de quatre modules nommés respectivement : « feedback pédagogique, IHM, gestionnaire de données, interactions et effets en RV ». Le module « feedback pédagogique » représente une instance du modèle que nous avons proposé dans la section 5.1. L'instance de ce modèle est utilisée dans le module « IHM » afin de structurer les feedbacks pédagogiques orientés vers les gestes dans les EVAH. Le module « IHM » permet aux utilisateurs de configurer les feedbacks, les déclencheurs ainsi que leurs propriétés. Il permet aussi « d'accéder aux » et « de modifier les » données stockées à travers le « gestionnaire de données ». Son mode d'utilisation et de fonctionnement est décrit dans la section 5.2.3. Le « gestionnaire de données » gère deux types de données, il s'agit des données liées : (i) aux propriétés des feedbacks et des déclencheurs créés, (ii) aux traces sur l'utilisation de ces feedbacks par les apprenants dans les EVAH (*e.g.* le type d'un feedback, le nombre de fois où un feedback est déclenché). Les données du point (i) sont ensuite utilisées pour matérialiser les feedbacks en EV grâce au module « interactions et effets en RV ». Ce dernier module permet aussi à l'utilisateur final d'interagir avec l'EV (*ex.* sélectionner un OI).

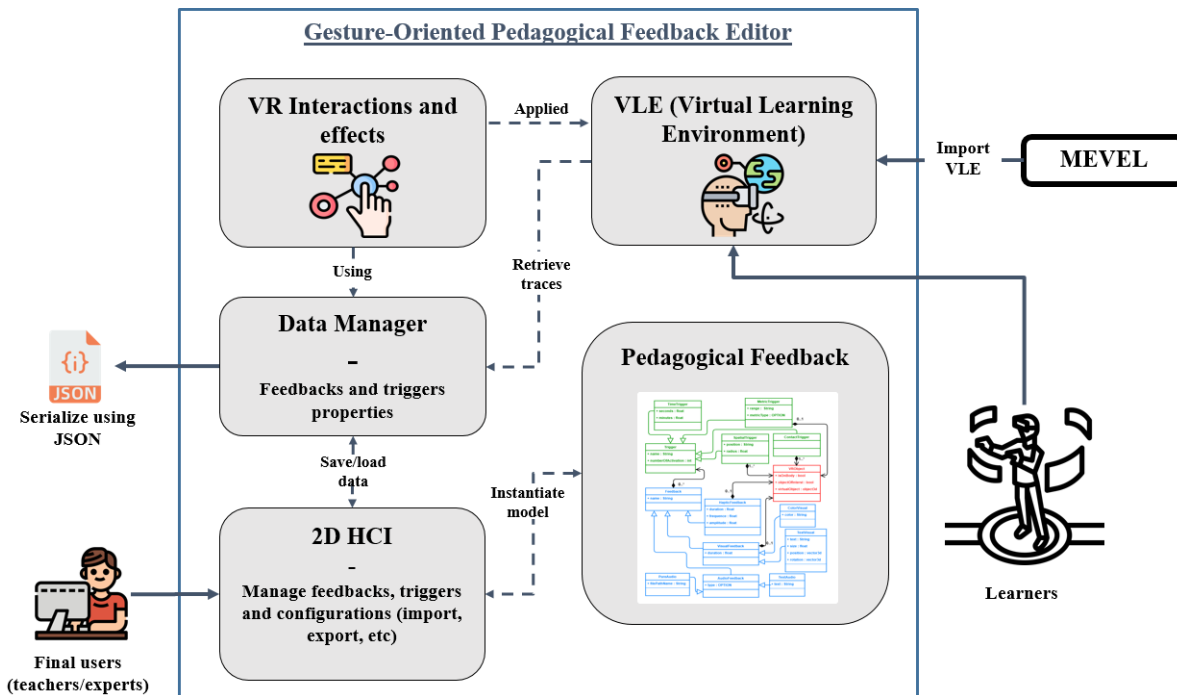


FIGURE 5.4 – Architecture logique de haut niveau du système GEFEED

L'EVAH importé joue un rôle majeur étant donné qu'il sert aussi bien aux apprenants pour la réalisation de la tâche à apprendre, mais aussi aux enseignants pour tester et valider les feedbacks créés. Les traces enregistrées serviront à aider l'enseignant dans son analyse de l'activité de l'apprenant après la réalisation de la tâche, par exemple pour analyser si chacune des étapes d'une tâche a été correctement réalisée ou non. L'organisation des modules de l'architecture que nous proposons implique que, pour utiliser le système, les utilisateurs doivent répondre aux trois questions suivantes :

- (i) Quel est l'objet ou l'artefact 3D dont les caractéristiques spatiales et/ou temporelles doivent être analysées ?
- (ii) Sous quelles conditions spatiales et/ou temporelles le feedback doit se déclencher ?
- (iii) Quelle est la modalité et quelles sont les propriétés du feedback appropriées pour représenter l'information pédagogique à transmettre aux apprenants ?

Les utilisateurs finaux pourront par la suite utiliser des IHM associées à l'architecture proposée pour définir les feedbacks et les déclencheurs nécessaires permettant d'atteindre leurs objectifs pédagogiques. Dans la section suivante, nous présentons ces IHM ayant

pour vocation de permettre aux enseignants de créer des feedbacks et des déclencheurs dans tout EVAH. Ces IHM ont été implémentées avec le moteur Unity version 2019.

5.2.3 Interface et interactions

Notre objectif est de fournir un outil qui permet aux utilisateurs sans ou avec peu de connaissances en informatique de créer des feedbacks ainsi que des déclencheurs en utilisant des IHM appropriées.

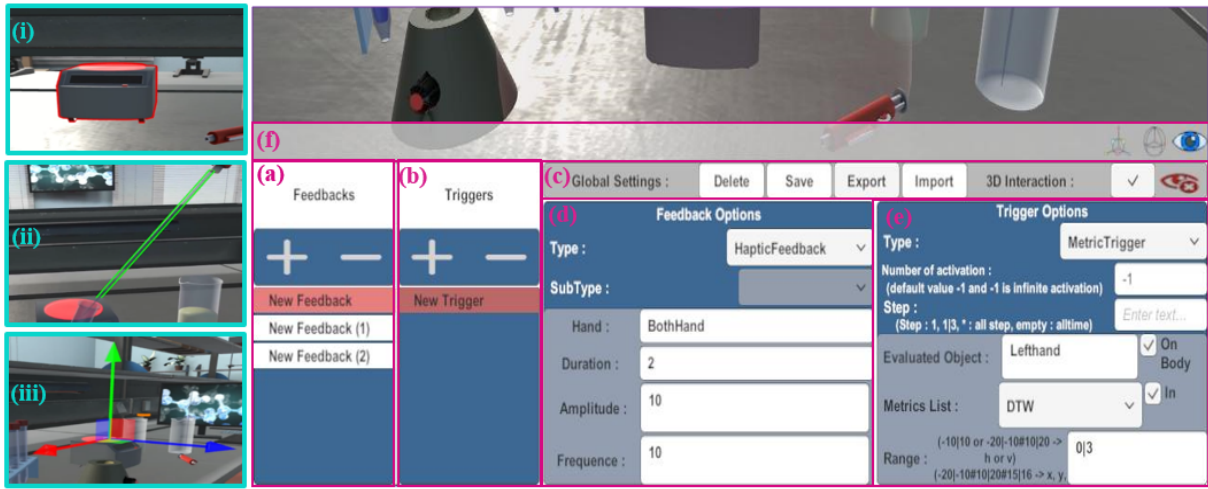


FIGURE 5.5 – Interface graphique du système GEFEED

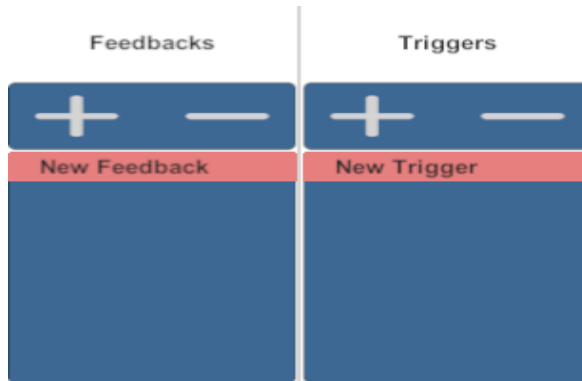
La figure 5.5 présente l'interface graphique proposée (partie entourée en rose). Grâce à cette interface, les utilisateurs finaux peuvent gérer (créer, modifier et supprimer) des feedbacks, des déclencheurs ainsi que leurs propriétés, gérer (enregistrer, supprimer, importer ou exporter) les configurations existantes. Cette interface en 2D n'est pas visible dans l'EVAH, elle est uniquement utilisée pour configurer le système et peut être masquée (en cliquant sur l'icône rouge présente en haut à droite). Les figures 5.5 (a) et (b) sont utilisées respectivement pour gérer les feedbacks et les déclencheurs. Les feedbacks et les déclencheurs sont identifiés par leurs noms uniques, leurs propriétés peuvent être modifiées respectivement avec les parties des figures 5.5 (d) et (e). La zone (c) de la figure 5.5 est utilisée pour supprimer, importer ou exporter des configurations. Cette zone sert aussi à activer le système d'interaction 3D. Le système d'interaction 3D permet à l'utilisateur d'interagir avec l'EVAH c'est-à-dire se déplacer dans l'EV et sélectionner des objets virtuels à l'aide d'une souris et d'un clavier. La partie (f) de la figure 5.5 permet de fournir des messages (sur les erreurs ou succès liés aux interactions avec l'interface) à l'utilisateur

final, les trois boutons de cette partie sont utilisés pour respectivement réaliser (1) une translation, (2) une rotation et (3) avoir plusieurs angles de vue d'un objet sélectionné dans l'EV (en haut, en bas, à gauche et à droite). L'utilisateur final peut, par exemple, définir dans l'EVAH, des emplacements de texte à afficher, la position de référence pour un déclencheur « spatial » (*ex.* figure 5.5 (iii)). Les figures 5.5 (i) et (ii) montrent des exemples de feedbacks activés grâce au système GEFEED. Pour illustrer l'utilisation de notre système, nous considérons la situation d'apprentissage présentée à la section 5.2.1, c'est-à-dire celle de la dilution d'une suspension en microbiologie. Dans cet exemple, nous considérons comme objectif pédagogique à atteindre, le fait que l'apprenant ne doit pas approcher la pro-pipette trop près de la source de chaleur électrique durant toute la durée de la tâche.

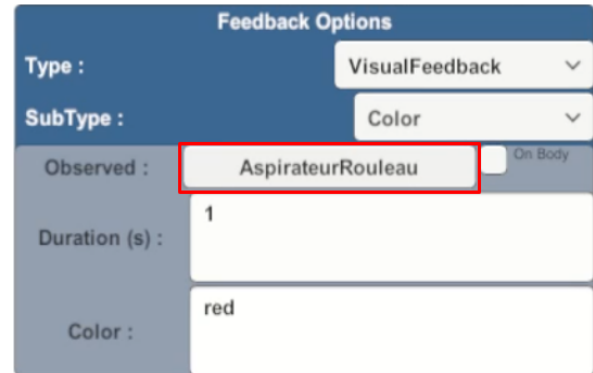
La figure 5.6 présente l'ensemble des étapes nécessaires à la création de ce feedback et son déclencheur. Pour créer ces entités et modifier leurs propriétés, l'utilisateur doit répondre aux trois questions liées à la création de ces entités et énumérées à la fin de la section 5.2.2. Ci-dessous se trouve, ces questions suivies de leurs réponses dans notre contexte. Les choix que nous avons réalisés servent uniquement d'exemple. En effet, ces choix dépendent des pratiques et objectifs pédagogiques des utilisateurs finaux.

- (i) Quel est l'objet ou l'artefact 3D dont les caractéristiques spatiales et/ou temporelles doivent être analysées ? La pro-pipette et la source de chaleur électrique
- (ii) Sous quelles conditions spatiales et/ou temporelles le feedback doit se déclencher ? Lorsque la pro-pipette est trop près de la source de chaleur électrique.
- (iii) Quelle est la modalité et quelles sont les propriétés du feedback appropriées pour représenter l'information pédagogique à transmettre aux apprenants ? L'utilisateur a ici choisi la modalité « visuelle » et le type « couleur » afin de mettre une couleur rouge sur les contours de l'un des deux objets impliqués. La pro-pipette devient rouge quand elle est trop près de la source indiquant à l'apprenant qu'il doit éloigner la pro-pipette de la source de chaleur.

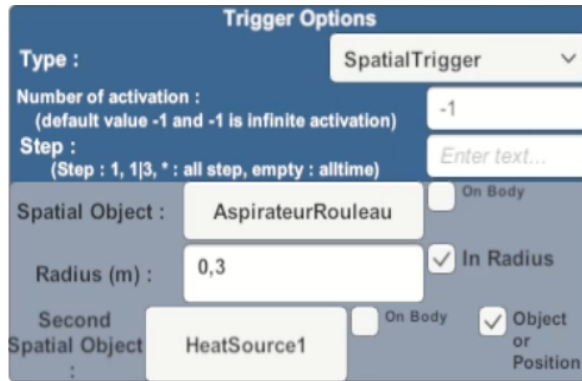
Une fois les réponses obtenues, la première étape (figure 5.6 (a)), consiste pour l'utilisateur à créer un feedback, puis le sélectionner et créer un déclencheur. Une fois sélectionné, le déclencheur qui vient d'être créé lui est automatiquement associé. Grâce aux réponses données précédemment, l'utilisateur va modifier les propriétés du feedback (*cf.* figure 5.6 (b)) et du déclencheur (*cf.* figure 5.6 (c)). Le feedback choisi est « visuel », il applique une couleur rouge sur le contour de la pro-pipette (dont le nom est “AspirateurRouleau” dans



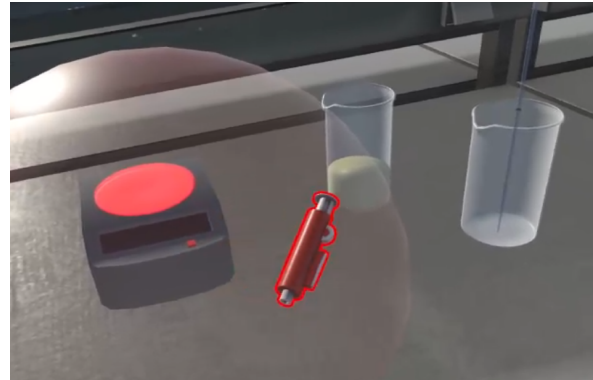
(a) Création d'un feedback et son déclencheur



(b) Définition des propriétés du feedback



(c) Définition des propriétés du déclencheur



(d) Matérialisation du feedback

FIGURE 5.6 – Étapes et observation de la création d'un feedback et d'un déclencheur

l'interface). Pour identifier la pro-pipette dans l'EV, l'utilisateur active les fonctionnalités d'interaction en EV (*cf.* figure 5.5 (c)), puis il se déplace dans l'EV grâce à la souris et au clavier. Une fois l'objet virtuel trouvé, il clique, dans l'interface graphique, sur le bouton représentant l'objet virtuel (*cf.* figure 5.6 (b), en rouge), ensuite il réalise un clic droit sur l'objet dans l'EV, ainsi l'objet est associé au feedback. Un double clic sur le bouton représentant l'objet virtuel permet d'avoir un zoom sur l'objet avec lequel il est lié. Notons que lorsqu'un objet est sélectionné dans l'EV, le contour de cet objet est colorié en cyan (*cf.* figure 5.7).

Quant au déclencheur, l'utilisateur a opté pour le déclencheur « spatial », car il permet de mesurer et de comparer la distance entre deux objets virtuels. Si la pro-pipette (*i.e.* “AspirateurRouleau”) et la source de chaleur électrique sont proches d'au moins 0,2 mètre, alors le feedback sera affiché à l'utilisateur (*cf.* figure 5.6 (d)). Le procédé utilisé pour sélectionner la pro-pipette et la source de chaleur est le même que celui décrit lors de l'édition du feedback. Nous présentons dans la section suivante une étude visant à valider

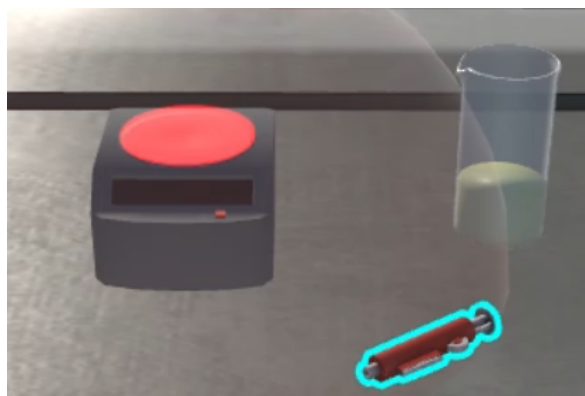


FIGURE 5.7 – Objet virtuel sélectionné en EV avec le système GEFEEED

l'ensemble du système présenté et son modèle de feedbacks pédagogiques sous-jacents sous l'angle de l'utilisabilité et l'utilité au travers d'une expérimentation.

5.3 Expérimentation : étude du système GEFEEED

L'objectif de cette expérimentation est de valider le système proposé et le modèle descriptif des feedbacks pédagogiques sous l'angle de : (a) l'utilisabilité du système proposé et (b) l'utilité des concepts sous-jacents impliqués. Cette étude est menée du point de vue de l'utilisateur final (expert/enseignant) dans le cadre de la mise en place d'une situation d'apprentissage de dilution d'une suspension en microbiologie.

5.3.1 Protocole et participants

Dix personnes, âgées de 26 à 54 ans (avec une moyenne de 42,8 ans) toutes exerçant dans le domaine de la biologie ont participé à cette expérience. Les participants sont des enseignants expérimentés (8) et des doctorants (2) ayant une expérience en enseignement. Ils ont répondu volontairement à un appel lancé à l'IUT de Laval à la suite de séances de travail avec deux autres enseignants de biologie. Chacun des participants a reçu des explications sur (i) la situation d'apprentissage (*i.e.* présentée à la section 5.2.1) ainsi que leurs rôles (enseignants) (ii) les différents concepts présentés dans la section 5.1 et (iii) le fonctionnement du système proposé. Le rôle des participants consiste à utiliser le système GEFEEED pour créer des feedbacks et des déclencheurs afin d'atteindre des objectifs pédagogiques. Après les explications, les participants ont visionné une vidéo²

2. <https://lium-cloud.univ-lemans.fr/index.php/s/soLc9kxYj2Z36SL>

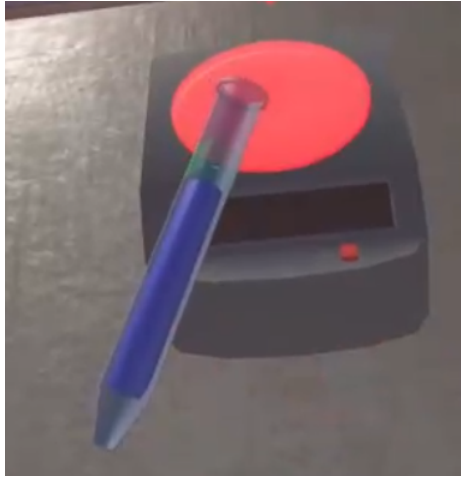


FIGURE 5.8 – Participant en train de flamber l’entrée du tube à essai, objectif pédagogique 1, partie 1

dans laquelle le système GEFEEED est utilisé afin de créer deux exemples de feedbacks et deux déclencheurs associés dans l’EVAH dédié à l’apprentissage de la dilution. Les deux feedbacks rajoutent respectivement la couleur verte grâce à un déclencheur temporel (*i.e.* s’activant toutes les 5 secondes) et jaune grâce à un déclencheur spatial qui mesure la distance entre deux tubes à essai (*i.e.* lorsqu’un tube à essai entre dans un rayon de 0,5 mètre de la source de chaleur). Par la suite, les participants suivent un ensemble d’instructions regroupées en trois parties (*cf.* annexe D). La première partie demande aux participants de créer trois feedbacks et leurs trois déclencheurs associés selon des objectifs pédagogiques préalablement établis. Les propriétés de chaque feedback et déclencheur sont fournies à l’enseignant. La liste ci-dessous présente les objectifs pédagogiques de cette première partie :

- **Objectif pédagogique 1** : flamber (stériliser) l’entrée du tube à essai contenant le liquide à diluer
- **Objectif pédagogique 2** : les deux mains ne doivent pas se toucher durant la réalisation de la tâche
- **Objectif pédagogique 3** : les mouvements des mains doivent être fluides durant la réalisation de la tâche

À titre d’exemple, considérons l’objectif pédagogique 1 de cette première partie. La figure 5.8 présente un apprenant réalisant cet objectif c’est-à-dire flamber l’entrée du tube à essai.

Un enseignant peut créer un feedback avec les propriétés suivantes :

- Type : HapticFeedback (feedback haptique)
- Objet d'intérêt : LeftHand (contrôleur tenu par la main gauche)
- Durée : 1 seconde
- Amplitude : 10 Pascal
- Fréquence : 10 Hertz

Il s'agit pour l'enseignant de faire vibrer un contrôleur lorsque l'apprenant atteint l'objectif pédagogique, dans l'optique d'éviter que ce dernier ne se brûle par exemple. Ainsi, l'enseignant crée un feedback de type « haptique » puis lui attribue un OI (la main gauche dans cet exemple). La durée, l'amplitude ainsi que la fréquence de ce feedback sont définies par la suite. Les propriétés du déclencheur proposé et associé au feedback créé peuvent être celles présentées dans la liste ci-dessous :

- Type : SpatialTrigger (déclencheur spatial)
- Spatial Object : tube à essai contenant la solution bleue
- Radius : 0,3 mètre
- Second Spatial Object (OnBody : False) : source de chaleur électrique
- Number of activation : -1 (à l'infini)

Un déclencheur « spatial » vérifiant que l'OI (*Spatial Object*) entre dans un rayon de 0,3 mètre de la source de chaleur électrique (*Second Spatial Object*). La seconde partie propose trois objectifs pédagogiques, les participants sont invités à créer des feedbacks et des déclencheurs permettant d'atteindre ces objectifs. Les objectifs pédagogiques de la seconde partie sont présentés dans la liste ci-dessous :

- **Objectif pédagogique 1** : le tube à essai contenant le liquide bleu doit être tenu à la verticale
- **Objectif pédagogique 2** : les mains de l'utilisateur ne doivent pas sortir de la zone de travail
- **Objectif pédagogique 3** : la pipette doit être tenue à l'horizontale

L'ensemble des objectifs pédagogiques des parties 1 et 2 ont été définis à la suite d'interviews menées avec deux enseignants de biologie. La dernière partie propose aux participants de définir au maximum trois objectifs pédagogiques puis de créer les feedbacks et les déclencheurs associés.

L'expérimentation est structurée autour de trois parties à raison d'un objectif de recherche par partie. La première partie, très cadrée, se concentre sur la prise en main du système et ce faisant, sur les aspects ergonomiques de son IHM. En spécifiant uniquement les objectifs pédagogiques, la deuxième partie permet d'observer si l'enseignant est capable de générer un feedback *ex nihilo* permettant de transmettre l'information qu'il souhaite à l'apprenant selon la représentation virtuelle choisie. La dernière partie a pour but d'étudier les possibilités fonctionnelles de GEFEED et l'utilité du système face aux objectifs pédagogiques propres à l'enseignant. Une fois l'expérimentation terminée, les enseignants ont rempli deux questionnaires portant sur l'utilisabilité du système GEFEED et l'utilité des concepts proposés. Durant l'expérimentation, le système a enregistré pour tous les groupes, le temps mis pour réaliser les configurations des trois parties.

5.3.2 Résultats

Les participants ont tous réussi à suivre les instructions fournies. L'ensemble des configurations (fichier csv) des parties 2 et 3 des instructions réalisées par les participants sont disponibles à cette adresse³. Le temps moyen pour réaliser l'ensemble des instructions a été de 26,991 minutes avec un écart type de 5.663.

5.3.2.1 Configurations réalisées

Les configurations présentées ne concernent que les parties 2 et 3 des instructions (*cf.* annexe D) du protocole expérimental, la première partie servant d'exemple aux enseignants sans marge de liberté dans la création de ces configurations.

Deuxième partie Dans la deuxième partie, il y a trois objectifs pédagogiques à atteindre. Il faut donc créer un couple (feedback et déclencheur) par objectif pédagogique. Les tableaux 5.3 et 5.4 présentent respectivement le nombre de feedbacks (par modalité suivie du type) et de déclencheurs (par type) utilisés pour chaque objectif pédagogique. Sur l'ensemble des trois objectifs pédagogiques de cette deuxième partie, le feedback « visuel » est le plus utilisé (12 fois), suivi par le feedback « auditif » et « haptique » (9 fois respectivement). Le type « couleur » de la modalité « visuelle » est le plus utilisé (8/12).

Étant donné le contexte de l'expérimentation, les enseignants n'ont pas utilisé le type « fichier audio fourni par l'utilisateur » de la modalité « auditive ». En effet, le fichier

3. <https://lium-cloud.univ-lemans.fr/index.php/s/LExabnibya8wvtQ>

Modalités	Propriétés	Objectifs pédagogiques		
		1	2	3
Visuelle	couleur	2	4	2
	texte	2	1	1
Haptique	vibration	4	1	4
Auditive	à partir d'un texte	2	4	3

TABLE 5.3 – Feedbacks choisis pour la 2^{ème} phase de l'expérimentation

audio doit être préparé en avance et fourni par l'enseignant. En outre, aucun ensemble de fichiers audios pré-enregistrés et aucun dispositif d'enregistrement de la voix n'ont été mis en place pour cette expérimentation. En ce qui concerne les déclencheurs, le plus utilisé est celui de type « métrique » (15) suivi de près par le déclencheur « spatial » (13). Le déclencheur « temporel » n'a pas été utilisé durant cette deuxième partie.

		Objectifs pédagogiques		
		1	2	3
Types	Contact	1	0	1
	Métrique	7	1	7
	Spatial	2	9	2
	Temporelle	0	0	0

TABLE 5.4 – Déclencheurs choisis pour la 2^{ème} phase de l'expérimentation

Le tableau 5.5 présente la corrélation entre les feedbacks et les déclencheurs utilisés. Les différentes modalités de feedbacks sont représentées par les lettres “V”, “H” et “A” correspondent respectivement aux modalités « visuelle », « haptique » et « auditive ».

		Objectifs pédagogiques								
		1			2			3		
		V	H	A	V	H	A	V	H	A
Types	Contact	1							1	
	Métrique	3	2	2	1			3	3	1
	Spatial		2		4	1	4			2

TABLE 5.5 – Corrélation entre les feedbacks et les déclencheurs choisis pour la 2^{ème} phase de l'expérimentation

On constate que le couple de feedback et de déclencheur (visuel/métrique) est le plus utilisé pour l'objectif pédagogique 1. Les couples (visuel/spatial) et (auditif/spatial)

sont les plus utilisés pour l'objectif 2. Tandis les couples (visuel/métrique) et (haptique/métrique) sont les plus utilisés pour l'objectif 3. Il faut noter que sur l'ensemble des 3 objectifs pédagogiques de cette deuxième partie, le couple (visuel/métrique) est le plus utilisé.

Troisième partie La troisième partie du protocole est facultative *i.e.* chaque participant peut proposer un maximum de trois objectifs pédagogiques, puis créer les feedbacks et déclencheurs permettant de les atteindre. Deux participants ont proposé 3 objectifs pédagogiques, 4 participants en ont proposé 2 et 2 participants ont proposé 1 objectif pédagogique. Ce qui représente un total de 8 personnes ayant 16 objectifs pédagogiques en tout dans cette partie. L'ensemble des objectifs pédagogiques proposés par les enseignants dans cette troisième partie se trouve à l'annexe E. Nous en présentons quelques-uns à titre d'illustration, il s'agit notamment de :

- Passer le tube au vortex (homogénéiser) avant de prélever
- Placer la pipette dans le bêcher de Javel après prélèvement
- La pipette doit bien être fixée sur l'aspirateur rouleau

Les tableaux 5.6 et 5.7 présentent respectivement le nombre de feedbacks et de déclencheurs utilisés pour chaque objectif pédagogique.

		Objectifs pédagogiques
Modalités	Visuelle	2
	Haptique	6
	Auditive	8

TABLE 5.6 – Feedbacks choisis pour la 3^{ème} phase de l'expérimentation

		Objectifs pédagogiques
Types	Contact	9
	Métrique	1
	Spatial	5
	Temporelle	1

TABLE 5.7 – Déclencheurs choisis pour la 3^{ème} phase de l'expérimentation

Sur l'ensemble des objectifs pédagogiques de cette troisième partie, le feedback « auditif » est le plus utilisé (8) et le feedback « visuel » (2) le moins utilisé. Quant aux

déclencheurs, le plus utilisé est celui de type « contact » (9) et les moins utilisés sont ceux de type « temporel » (1) et « métrique » (1).

Le tableau 5.8 présente la corrélation entre les feedbacks et les déclencheurs utilisés dans la troisième partie.

		Objectifs pédagogiques		
		V	H	A
Types	Contact	2	3	4
	Métrique			1
	Spatial		3	2
	Temporelle			1

TABLE 5.8 – Corrélation entre les feedbacks et les déclencheurs choisis pour la 3^{ème} phase de l'expérimentation

On constate que le couple de feedback et de déclencheur (auditif/contact) est le plus utilisé dans cette partie. En résumé, on observe que les choix des feedbacks et des déclencheurs ont beaucoup varié dans les parties 2 et 3, quel que soit l'objectif pédagogique considéré. Dans la deuxième partie, le feedback « visuel » est le plus utilisé et le feedback « auditif » le moins utilisé. Le déclencheur « métrique » est le plus utilisé et le déclencheur « temporel » le moins utilisé. L'association de feedback « visuel » et de déclencheur « métrique » est la plus utilisée. Dans la troisième partie, le feedback « auditif » et le déclencheur « contact » sont les plus utilisés. Tandis que le feedback « visuel » et le déclencheur « contact » sont les moins utilisés. L'association de feedback « auditif » et de déclencheur « contact » est la plus utilisée dans cette partie.

5.3.2.2 Analyse des concepts utilisés

Dans cette partie, nous analysons les réponses issues du questionnaire de l'annexe G. Ce questionnaire est divisé en trois grandes parties qui comportent des questions relatives à : (i) l'utilité des concepts (feedbacks et déclencheurs) proposés dans le contexte de l'activité de dilution (*cf.* tableau 5.9), (ii) l'utilité des concepts proposés dans un autre contexte (toute autre simulation pour l'apprentissage) (*cf.* tableau 5.10) et (iii) l'atteinte ou non des objectifs pédagogiques dans le contexte de l'EVAH utilisé (*cf.* tableau 5.11).

La première et deuxième partie comporte respectivement deux volets chacun, l'un sur les feedbacks avec 5 questions et l'autre sur les déclencheurs avec 4 questions, toutes les questions sont basées sur une échelle de Likert de 1 (très inutile) à 5 (très utile). La figure

Questions	1. Très inutile	2	3	4	5. Très utile
Feedbacks					
1. Le feedback visuel textuel est...					
2. Le feedback visuel couleur est...					
3. Le feedback audio à partir d'un fichier est...					
4. Le feedback audio à partir d'un texte est...					
5. Le feedback haptique (vibration) est...					
Déclencheurs					
1. Le déclencheur sur le temps est...					
2. Le déclencheur de contact est...					
3. Le déclencheur spatial est...					
4. Le déclencheur sur les métriques est...					

TABLE 5.9 – Questions sur l'utilité des feedbacks et des déclencheurs avec l'EVAH portant sur la dilution

5.9 présente respectivement les résultats des questions de la première partie (*cf.* tableau 5.9) du questionnaire *i.e.* portant sur l'utilité des feedbacks (*cf.* figure 5.9 (a)) et des déclencheurs (*cf.* figure 5.9 (b)) proposés dans le contexte de l'activité de dilution.

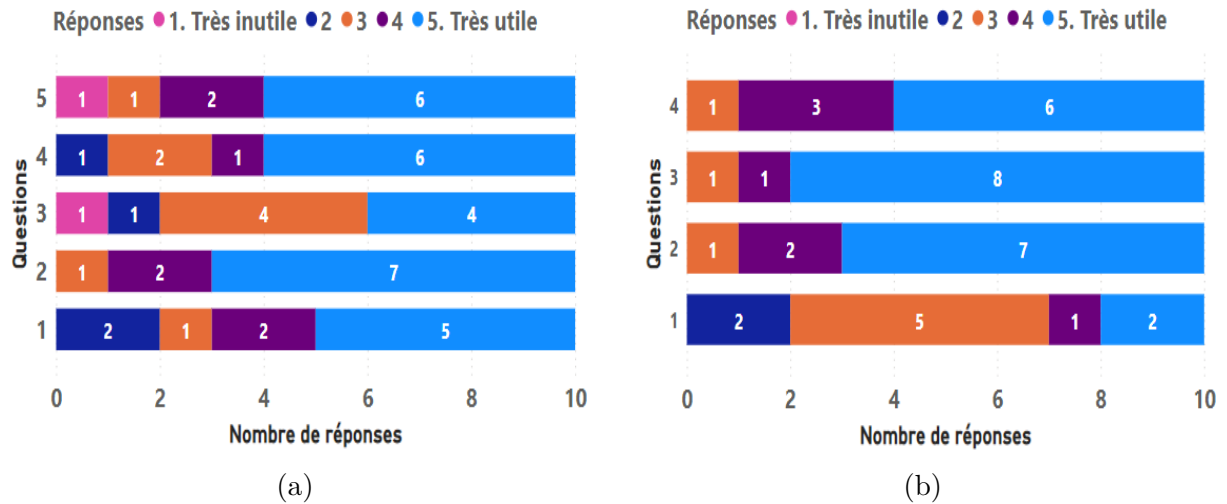


FIGURE 5.9 – Réponses des participants au questionnaire sur les feedbacks (a) et les déclencheurs (b) dans le contexte de la dilution

Le feedback de type « couleur » a été considéré comme le plus utile (réponse supérieure ou égale à 4) par les participants (9/10) tandis que le feedback « audio à partir d'un fichier » a été considéré comme le moins utile (4/10). Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que le feedback de type « couleur » a été le plus utilisé lors de l'expérimentation,

tandis que le feedback de type « audio à partir d'un fichier » n'a pas été utilisé.

De même, 7 participants ont trouvé les déclencheurs proposés utiles. Les déclencheurs « métriques, spatial et contact » sont les plus utiles (9/10) et le moins utile est le déclencheur « temporel » (3/10). On constate que les résultats sur les déclencheurs sont conformes aux traces de la section précédente. La figure 5.10 présente respectivement les résultats des questions de la deuxième partie (*cf.* tableau 5.10) du questionnaire *i.e.* portant sur l'utilité des feedbacks (*cf.* figure 5.10 (a)) et des déclencheurs (*cf.* figure 5.10 (b)) proposés dans d'autres situations d'apprentissage. Les feedbacks de type « couleur » et de la modalité « haptique » ont été considérés comme les plus utiles par les participants (8/10) tandis que le feedback « audio à partir d'un fichier » a été considéré comme le moins utile (5/10). En outre, 7 participants ont trouvé les déclencheurs proposés utiles. Les déclencheurs considérés comme les plus utiles sont ceux de type « métriques » et de type « contact » (9/10) et le moins utile est celui de type « temporel » (5/10).

Questions	1. Très inutile	2	3	4	5. Très utile
Feedbacks					
1. Le feedback visuel textuel pourrait être...					
2. Le feedback visuel couleur pourrait être...					
3. Le feedback audio à partir d'un fichier pourrait être...					
4. Le feedback audio à partir d'un texte pourrait être...					
5. Le feedback haptique (vibration) pourrait être...					
Déclencheurs					
1. Le déclencheur sur le temps pourrait être...					
2. Le déclencheur de contact pourrait être...					
3. Le déclencheur spatial pourrait être...					
4. Le déclencheur sur les métriques pourrait être...					

TABLE 5.10 – Questions sur l'utilité des feedbacks et des déclencheurs dans d'autres contextes

Dans la troisième partie, nous avons posé deux questions (*cf.* tableau 5.11) afin d'évaluer si les concepts proposés ont permis aux participants d'atteindre ou non leurs objectifs pédagogiques. Ces questions sont basées sur une échelle de Likert allant de 1 (pas du tout d'accord) à 5 (tout à fait d'accord).

La figure 5.11 présente les résultats de ces questions. On peut noter que l'ensemble

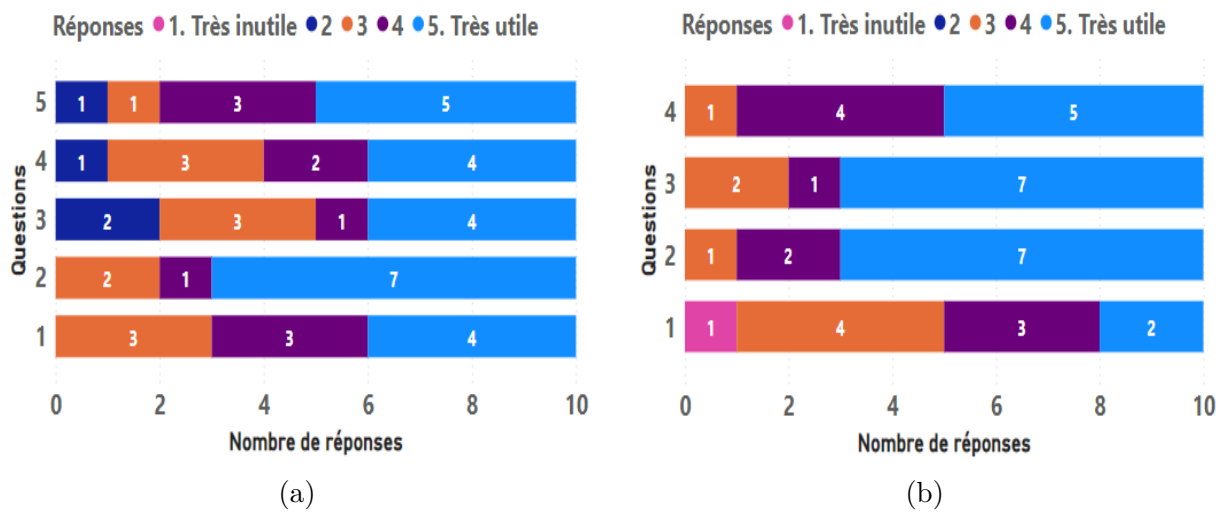


FIGURE 5.10 – Réponses au questionnaire sur les feedbacks (a) et les déclencheurs (b) dans d'autres contextes

Questions	1. Pas du tout d'accord	2	3	4	5. Tout à fait d'accord
Les feedbacks que vous avez créés vous ont permis d'atteindre vos objectifs...					
Les déclencheurs que vous avez créés vous ont permis d'atteindre vos objectifs...					

TABLE 5.11 – Questions sur les objectifs pédagogiques

des participants (excepté 1 participant) sont d'accord avec le fait que les feedbacks et les déclencheurs créés leur ont permis d'atteindre leurs objectifs pédagogiques (réponses supérieures ou égales à 4).

5.3.2.3 Utilisabilité

Nous avons étudié l'utilisabilité du système proposé à l'aide du questionnaire basé sur le modèle F-SUS (*cf.* annexe F) de GRONIER *et al.* (2021), version française du modèle SUS (BROOKE, 1996 ; BROOKE, 2013). Le questionnaire SUS a été créé en 1986 par Brooke dans le cadre d'un programme d'ingénierie sur l'utilisabilité des systèmes. Il permet de mesurer de manière subjective l'utilisabilité perçue, tout en garantissant une prise en main rapide pour les utilisateurs interrogés (GRONIER *et al.*, 2021). Notre objectif est de recueillir et analyser de manière qualitative les impressions des enseignants, concernant l'utilisation

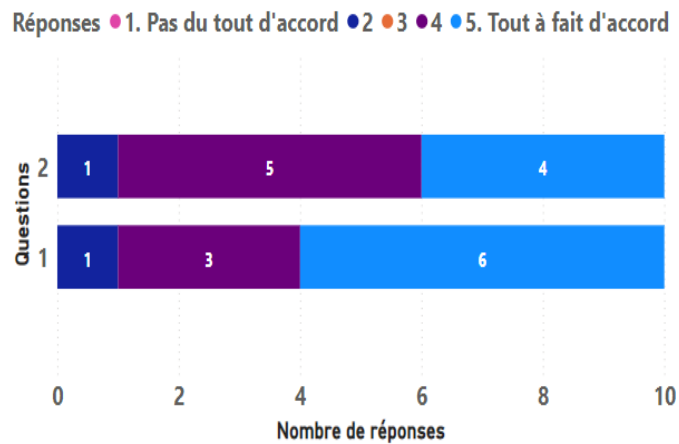


FIGURE 5.11 – Questionnaire sur l'atteinte des objectifs pédagogiques

de l'éditeur proposé dans le cadre de la gestion de feedbacks et de déclencheurs dans les EVAH dédiés aux gestes. L'objectif est d'évaluer : (i) la satisfaction des enseignants vis-à-vis de l'outil proposé (ii), leurs difficultés éventuelles liées à la prise en main de ses fonctionnalités lors du suivi des instructions fournies et (iii), si les interfaces proposées dans l'éditeur sont faciles à comprendre et à prendre en main. Le F-SUS tout comme le SUS est composé de 10 questions sur une échelle de Likert de 1 à 5 (de « pas du tout d'accord » à « tout à fait d'accord »).

Les chercheurs ont estimé qu'une note moyenne supérieure à 3 pour une question signifiait que la dimension évaluée donnait satisfaction. Toutes les questions du modèle sont conçues pour couvrir de multiples aspects de l'utilisabilité des systèmes (acceptabilité, complexité, etc.).

Les scores des participants sont présentés dans le tableau 5.13. La figure 5.12 positionne le score moyen que nous avons obtenu sur l'échelle d'acceptabilité du questionnaire F-SUS. Un système est considéré comme « acceptable » à partir de 50,9/100 points.

Le score moyen que nous avons obtenu est de 60,75 points avec un écart type de 15,57 sur les 10 enseignants. Le score le plus bas est de 32,5/100 et le plus haut de 82,5/100. Cette moyenne indique que le système est classé dans la catégorie « Ok ». Globalement, la moyenne obtenue indique que l'éditeur de feedback est perçu comme étant acceptable (*cf.* échelle d'acceptabilité sur la figure 5.12).

Dans l'ensemble, les participants ont été satisfaits de l'outil proposé, seulement 3/10 n'ont pas dépassé un score F-SUS de 50/100. À la question « Ce système est facile à utiliser », 6 enseignants ont donné des réponses comprises entre 3 et 5 (tout à fait d'accord)

Questions	1. Pas du tout d'accord	2	3	4	5. Tout fait d'accord
1. Je voudrais utiliser ce système fréquemment					
2. Ce système est inutilement complexe					
3. Ce système est facile à utiliser					
4. J'aurais besoin du soutien d'un technicien pour être capable d'utiliser ce système					
5. Les différentes fonctionnalités de ce système sont bien intégrées					
6. Il y a trop d'incohérences dans ce système					
7. La plupart des gens apprendront à utiliser ce système très rapidement					
8. Ce système est très lourd à utiliser					
9. Je me suis senti · e très en confiance en utilisant ce système					
10. J'ai eu besoin d'apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir utiliser ce système					

TABLE 5.12 – Questions du modèle F-SUS

Participants	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Scores	40	60	47,5	60	75	67,5	77,5	32,5	82,5	65

TABLE 5.13 – Scores F-SUS obtenus pour les 10 participants

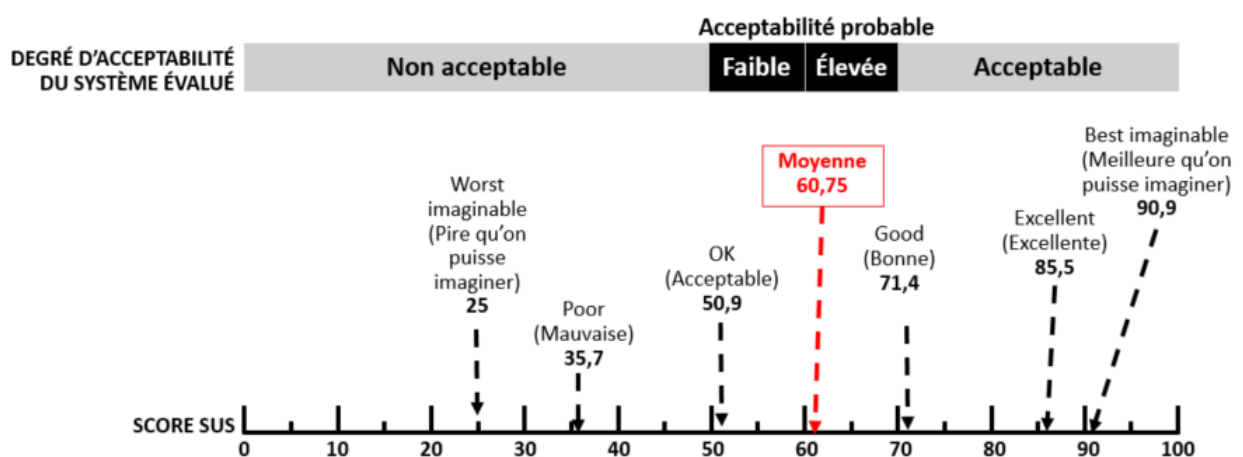


FIGURE 5.12 – Moyenne du score F-SUS (en rouge) obtenue

ce qui indique que l'utilisation de l'éditeur de feedback a été perçue en général comme intuitive. En outre, 8 enseignants ont trouvé que les fonctionnalités du système étaient bien intégrées. Cependant, grâce à une question ouverte, nous avons reçu des commentaires sur l'amélioration de l'IHM, par exemple, en ce qui concerne les choix des parties du corps sur lesquels l'utilisateur souhaite faire des actions. Pour l'instant, ce choix s'opère en indiquant de façon textuelle la partie du corps que l'on souhaite (*ex. lefthand* pour indiquer la main gauche). Selon les participants, il serait intéressant d'avoir une liste déroulante pour réaliser ce choix.

5.3.3 Discussion

L'objectif de cette expérimentation est d'analyser (a) les stratégies des participants en termes de création des feedbacks et des déclencheurs, (b) l'utilisabilité et l'utilité du système proposé ainsi que (c) l'appropriation des concepts proposés du point de vue de l'enseignant et (d) évaluer l'hypothèse suivante :

- l'opérationnalisation d'un modèle descriptif de feedbacks pédagogiques à 4 dimensions « artefact virtuel d'intérêts, métrique d'évaluation, déclencheur, feedback multimodal » *via* le système GEFEEED permet aux enseignants d'atteindre leurs objectifs en termes de retour pédagogique en EV (*Hypothèse 2*).

Tous les participants ont été en mesure de suivre et réaliser l'ensemble du protocole expérimental (avec une moyenne de 26,991 minutes). En termes de résultats, nous avons constaté que, pour un même objectif pédagogique, les feedbacks et déclencheurs choisis varient grandement. D'après les résultats, on peut dire que le système GEFEEED a permis aux enseignants de mettre en œuvre différentes stratégies pour fournir les aides aux apprenants. L'association de la modalité « visuelle » et le déclencheur « métrique » sont les plus utilisés dans le contexte de l'EVAH utilisée et des objectifs pédagogiques définis dans la partie 2. Dans la partie 3, l'association du feedback « auditif » et du déclencheur « contact » est la plus utilisée. Pour ce qui est des concepts proposés, ils ont permis à tous les utilisateurs d'atteindre leurs objectifs en termes de retours pédagogiques. De plus, la majorité des concepts proposés ont été qualifiés d'utiles. Cependant, les participants n'ont pas trouvé utile le déclencheur « temporel », et ce dernier a été peu utilisé. Néanmoins, ceci peut s'expliquer par le fait que la situation d'apprentissage expérimentée ne suggérait pas de contrainte temporelle dans l'exécution des tâches. Les tendances observées dans la première partie du questionnaire confirment les traces des enseignants. Le feedback

« audio à partir d'un fichier » n'a pas été trouvé utile, car ce dernier n'a pas été utilisé durant l'expérimentation, à contrario, le feedback « visuel » a été trouvé utile et ce dernier a été le plus utilisé lors de l'expérimentation. De même, le déclencheur « temporel » a été peu utilisé durant l'expérimentation et est le moins utile selon le questionnaire tandis que les déclencheurs « métriques, spatiaux et de contact » ont été trouvés utiles selon le questionnaire, bien que le déclencheur « métrique » a été le plus utilisé selon les traces. Par ailleurs, en termes d'utilisabilité, le système GEFEED a obtenu une moyenne F-SUS de 60,75/100. Ce score indique que l'IHM proposée a été acceptée par la majorité des participants, bien que 8/10 participants n'avaient pas d'expérience en RV. Ces résultats encourageants constituent une première évaluation du système proposé. À partir de ces résultats, nous pouvons, en partie, confirmer l'*Hypothèse 2*. « En partie » car ces résultats, si valides, ne peuvent l'être que dans les conditions définies par cette expérimentation incluant un unique EVAH et une même tâche à apprendre. En outre, l'ensemble des résultats de cette étude sont discutables étant donné le faible nombre des participants (10). Des perspectives d'améliorations seront présentées dans la section 7.2.4 du chapitre 7.

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous vous avons présenté un modèle descriptif opérationnalisé dans le système GEFEED, permettant la gestion (*i.e.* création, modification, suppression) de feedbacks pédagogiques orientés vers les gestes dans les EVAH. Ce système constitue une contribution complémentaire au système *MEVEL* présenté dans le chapitre 4. Les contributions de ce chapitre ainsi que ceux du chapitre 4 ont permis d'apporter quelques réponses aux questions de recherche suivantes :

- Quels sont les modèles appropriés qui permettent l'analyse, l'évaluation et la restitution d'informations (feedbacks pédagogiques) en EV, ces informations aidant l'apprenant dans l'apprentissage et la réalisation des gestes ? (*Question 2*)
- Comment opérationnaliser ces éléments (méthodes de création d'une situation d'apprentissage, modèles de feedbacks pédagogiques) au sein d'un EV existant ? (*Question 3*)

Pour rappel, au chapitre 4, nous avons proposé une méthode, des interfaces et des paradigmes d'interaction opérationnalisés au sein du système *MEVEL* afin d'assister les enseignants/experts dans la construction de situations d'apprentissage évaluables dans les

EVAH. Le système GEFEEED proposé au sein de chapitre permet aux enseignants/experts de créer, à partir d'un EVAH existant, des feedbacks pédagogiques, afin d'assister et de guider l'apprenant dans l'apprentissage des gestes. On peut créer 3 types de feedback (visuel, audio et haptique), ainsi que 4 types de déclencheurs (de type contact, métrique, spatial et temporel). Les déclencheurs sont liés aux feedbacks et représentent un ensemble de règles définies par l'utilisateur afin de montrer ou non les feedbacks aux apprenants. Pour gérer ces feedbacks et ces déclencheurs, nous avons proposé une IHM basée sur un système de menus 2D ainsi qu'une pré-visualisation 3D de l'EV augmenté avec les feedbacks. Les menus permettent de définir un ensemble de propriétés des feedbacks (*e.g.* objets virtuels impliqués, types, etc.) et des déclencheurs associés (*e.g.* métriques utilisées, valeurs d'acceptabilités, etc.). Le modèle et le système proposé ont été implémentés avec le moteur *Unity* et ont pour objectif de lever le verrou suivant :

- décrire un modèle opérationnalisable permettant, à n'importe quel enseignant/expert, de formaliser un retour pédagogique en EV en fonction de ces pratiques pédagogiques c'est-à-dire, décrire : (a) ce qui sera mesuré ou évalué à partir de l'activité gestuelle (b), la représentation visuelle, audio ou haptique du retour à donner en EV en fonction de ces mesures et (c), les règles de déclenchement de ce retour (*Verrou 3*).

Une expérimentation a été réalisée en vue d'étudier (a) les productions des participants (feedbacks et déclencheurs), puis (b) l'utilisabilité du système proposé ainsi que (c) l'utilité des concepts utilisés du point de vue de l'utilisateur final (expert/enseignant) dans le cadre de la mise en place d'une situation d'apprentissage de dilution d'une suspension en microbiologie. L'objectif était de vérifier l'hypothèse suivante :

- l'opérationnalisation d'un modèle descriptif de feedbacks pédagogiques à 4 dimensions « artefact virtuel d'intérêts, métrique d'évaluation, déclencheur, feedback multimodal » *via* le système GEFEEED permet aux enseignants d'atteindre leurs objectifs en termes de retour pédagogique en EV (*Hypothèse 2*).

Il s'agissait pour les participants de gérer des feedbacks et des déclencheurs, en choisissant les types de feedbacks, les objets virtuels impliqués, les métriques utilisées, les seuils d'acceptabilité, etc. Une IHM a été conçue pour gérer des feedbacks et des déclencheurs, puis a été testée à travers l'EVAH mentionné. L'expérience a montré plusieurs résultats intéressants et encourageants justifiant le bien-fondé de l'approche proposée pour les utilisateurs finaux. Parmi ceux-ci, nous pouvons noter que le choix des feedbacks et des

déclencheurs varie grandement entre les enseignants pour un même objectif pédagogique et peut dépendre en conséquence de leurs pratiques pédagogiques. L'association de la modalité « visuelle » avec le déclencheur « métrique » ainsi que l'association de la modalité « auditive » et du déclencheur « contact » sont les plus utilisées dans le cadre de cette expérimentation. Les IHM proposées ont été acceptées par la majorité des participants. Les concepts proposés ont permis aux utilisateurs d'atteindre leurs objectifs pédagogiques. En outre, la majorité des concepts proposés ont été considérés comme utiles. L'*Hypothèse 2* est en partie confirmée dans le contexte expérimental considéré. Nous avons montré dans ce chapitre que le système proposé permet aux enseignants de gérer des feedbacks et des déclencheurs orientés vers l'apprentissage de gestes. Cependant, seul le point de vue de l'enseignant/expert sur la génération de ces EV enrichis a été considéré jusqu'à présent. Par conséquent, il nous semble nécessaire d'évaluer aussi l'impact des EV enrichis par MEVEL et GEFEED du point de vue des apprenants. C'est le sujet d'étude principal du chapitre suivant.

ÉVALUATION D'UN EV ADAPTÉ À L'APPRENTISSAGE DE GESTES

Nous avons présenté, respectivement dans les chapitres 4 et 5, deux systèmes dédiés à l'apprentissage de gestes. Le premier système dénommé MEVEL permet aux utilisateurs finaux (enseignants/experts) de construire des situations d'apprentissage évaluables et dédiées aux gestes dans les EVAH existants. Le second système appelé GEFEED permet d'assister les utilisateurs finaux pour la création de feedbacks pédagogiques dédiés aux gestes. Ces deux chapitres ont exploré le point de vue l'enseignant dans l'ensemble des contributions développées, afin d'obtenir un EV conforme à ses pratiques pédagogiques. Dans ce chapitre, nous présentons une expérimentation basée sur un EV adapté aux pratiques pédagogiques des enseignants à l'aide des deux systèmes proposés. L'objectif est, cette fois, de considérer le point de vue de l'apprenant en : (i) étudiant l'utilisabilité de l'EVAH enrichi par les deux systèmes et (ii) vérifiant les deux hypothèses suivantes :

- fournir des aides relatives à la décomposition spatiale et temporelle de la tâche à apprendre, via le système MEVEL a un impact positif sur l'apprentissage en termes de temps de réalisation de la tâche et rétention des étapes et actions à suivre ainsi que leur séquencement (*Hypothèse 3*) ;
- fournir des feedbacks pédagogiques adaptés aux gestes, en EV, via le système GEFEED, améliore l'acquisition de compétences gestuelles (*Hypothèse 4*).

Pour rappel, par compétence gestuelle, nous entendons le fait que le mouvement d'un Objet d'Intérêt (OI) respecte des propriétés (géométriques, cinématiques, temporelles, etc.). Les compétences gestuelles considérées pour cette expérimentation sont liées au maintien de propriétés géométriques dans le temps et déduites des besoins d'observation des enseignants (*cf.* section suivante). L'étude de ces propriétés, d'autres métriques (telles que le temps utilisé pour réaliser la tâche, le respect ou non des séquences d'actions lors de la réalisation du protocole, etc.) et l'analyse des retours des apprenants, nous permettront

de confirmer ou d'infirmer les hypothèses. Dans cette expérimentation, les participants ont travaillé sur la tâche de dilution d'une suspension en microbiologie. L'EVAH de cette tâche ainsi que l'ensemble des éléments nécessaires à la réalisation de la dilution ont été présentés dans la section 5.2.1 du chapitre 5. L'objectif pour les participants est de réaliser des dilutions tout en suivant les guides et prenant en compte les aides (les feedbacks en temps réel) des systèmes proposés lorsque ces guides et ces aides sont disponibles.

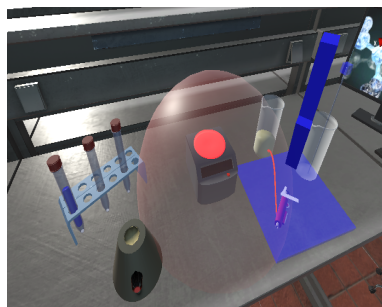
6.1 Configuration de l'EVAH

À partir d'interviews et de sessions de travail avec deux enseignants de biologie de l'IUT de LAVAL, nous avons extrait les besoins d'observations des enseignants, puis décomposé la tâche considérée en 11 étapes (*cf.* annexe H). Ces étapes, résumées dans le tableau 6.1, sont chacune composée d'un CP de départ (SCP) et d'un CP de fin (ECP). Ces CP sont placés de sorte à délimiter le début et la fin de l'étape concernée. Les étapes 3 et 7 contiennent en plus un CP intermédiaire (ICP). En ce qui concerne les besoins d'observations, nous avons identifié pour chaque étape, les OI ainsi que les compétences gestuelles à évaluer si existantes. Pour chaque étape, les OI sont présentés **en gras** et les compétences gestuelles *en italique* dans le tableau 6.1. Pour rappel, les OI sont des objets virtuels manipulés ou des parties du corps dont les mouvements sont observés, analysés et/ou évalués par les experts/enseignants. Les objets considérés comme des OI dans ce contexte sont les objets impliqués dans l'étape et dont l'enseignant souhaite analyser le mouvement. La figure 6.1 présente les configurations des étapes 1 à 3. Les CP appartenant à la même étape ont la même couleur (*ex.* bleu à l'étape 1, rouge à l'étape 2). En outre, au début de l'action d'une étape, une flèche indique à l'utilisateur l'OI de l'étape en question (*cf.* figure 6.1, a et b). L'ensemble de ces étapes, des CP et des OI ont été configurées grâce à MEVEL par nos soins à partir des interviews réalisées et validés par les enseignants. Suite à ces configurations, un expert (professeur de biologie) a réalisé une démonstration de la tâche à apprendre. Les participants ont ainsi la possibilité de rejouer la démonstration complète de l'expert ou d'une étape précise de la dilution dans l'EVAH à l'aide du système MEVEL.

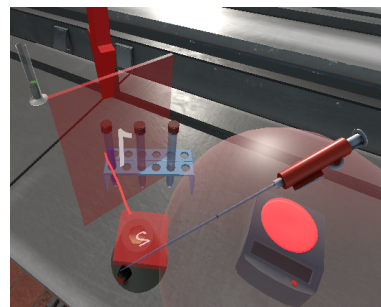
Plusieurs feedbacks visuels ont été créés à partir de GEFEED. Nous avons utilisé une seule modalité (visuelle) en vue d'évaluer l'impact des feedbacks de cette modalité sur l'apprentissage. Ces feedbacks ont pour objectif d'aider les participants lors de la réalisation de leurs tâches et sont liés aux compétences gestuelles (étapes 4 à 8) identifiées

Étapes	Actions
1	Prendre la pipette puis prendre la pro-pipette et la mettre sur la pipette
2	Prendre le tube à essai puis le poser sur le vortex (pour homogénéiser la suspension)
3	Enlever le bouchon du tube à essai et stériliser le col du tube à essai (à partir de cette étape, le tube est ouvert et doit rester dans la zone stérile)
4	Faire entrer la pipette dans le tube à essai (<i>maintenir la pipette et le tube à essai à la verticale lors du prélèvement</i>) puis aspirer la suspension à diluer
5	Retirer la pipette du tube à essai et <i>la positionner à l'horizontale</i> , stériliser le col du tube à essai et remettre le bouchon sur le tube à essai
6	Reposer le tube à essai sur le portoir en décalant au moins d'une ligne
7	Prendre le tube à essai (contenant le diluant, ici de l'eau), enlever le bouchon du tube à essai et stériliser son col (à partir de cette étape, le tube est ouvert et doit rester dans la zone stérile)
8	Faire rentrer la pipette dans le tube à essai (<i>maintenir la pipette à la verticale et le tube à essai penché</i> , avec la pointe de la pipette au contact de la paroi du tube) et injecter la suspension
9	Retirer la pipette du tube à essai , stériliser son col et remettre le bouchon
10	Passer le tube à essai sur le vortex (pour homogénéiser la suspension diluée) puis le reposer sur le portoir en le décalant au moins d'une ligne
11	Placer la pipette dans le bocal d'eau de javel

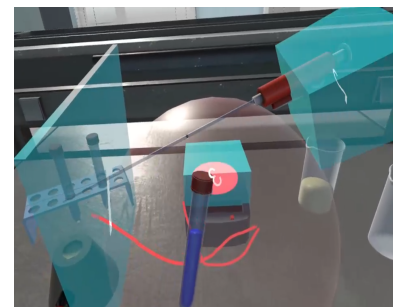
TABLE 6.1 – Résumé des étapes du protocole de dilution



(a) Étape 1



(b) Étape 2



(c) Étape 3

FIGURE 6.1 – Quelques exemples de configurations (CP, OI et trajectoire) des étapes de la tâche de dilution

dans les interviews menées. Il s'agit des actions suivantes :

- La pipette et le tube doivent être tenus à la **verticale** (étape 4)
- La pipette doit être tenue à l'**horizontale** (étape 5 à 7)
- La pipette doit être tenue à la **verticale** (étape 8)

Ces feedbacks consistent à changer la couleur des contours d'objets virtuels en utilisant trois niveaux de couleurs. La couleur est verte lorsque le geste est considéré comme « bon », jaune lorsqu'il est considéré comme « moyen » et rouge comme « mauvais ». Chacun de ces niveaux est associé à des valeurs d'acceptabilité préalablement définies par un expert.

Pour rappel, la métrique évaluant le fait qu'un objet est à l'horizontale ou à la verticale compare l'orientation du repère local de l'objet concerné au repère du monde virtuel. Par exemple, pour qu'un objet soit considéré à l'horizontale, il faut que l'axe y du repère local de cet objet fasse un angle de 90° ou $-90^\circ \pmod{\pi}$ avec l'axe y du repère du monde virtuel alors que cet angle sera de 0° ou $180^\circ \pmod{\pi}$ si l'objet est à la verticale. Les valeurs d'acceptabilité de ces métriques ont été définies par les utilisateurs finaux en considérant que si l'écart entre les valeurs des angles est de $\pm [0^\circ, 10^\circ[$ alors le geste est considéré comme « bon », s'il est de $\pm [10^\circ, 20^\circ[$ alors il est considéré comme « moyen » et « mauvais » sinon.

6.2 Protocole

Pour mesurer l'impact sur l'apprentissage de l'EVAH enrichi par MEVEL et GEFEED, trois groupes ont été formés (*cf.* figure 6.2). Le premier groupe ne dispose d'aucune aide (absence de CP et de feedbacks). Le second groupe peut observer la décomposition en étapes du protocole de dilution, c'est-à-dire les CP et les trajectoires des mouvements *via* MEVEL. En plus d'avoir accès aux configurations du système MEVEL, le groupe 3 reçoit des feedbacks issus de l'éditeur de feedbacks pédagogiques (GEFEED) en temps réel. Chacun des participants, en fonction du groupe auquel il appartient, a reçu des explications sur : (i) la situation d'apprentissage présentée à la section 5.2.1 du chapitre 5 et utilisée dans cette expérimentation, (ii) leurs rôles (*i.e.* apprenants) ainsi que (iii) les éventuelles aides (*i.e.* CP, trajectoires et feedbacks) fournies. En outre, nous avons montré une vidéo¹ aux participants dans laquelle on voit un utilisateur réaliser la dilution d'une suspension de microbiologie dans un EVAH avec ou sans aides, en fonction du groupe du participant.

Une fois les explications fournies et la vidéo visionnée, les participants se sont entraînés dans une scène dans laquelle les objets nécessaires à la réalisation d'une dilution n'étaient pas disposés correctement (*cf.* figure 6.3, a). Les participants doivent disposer correctement (*cf.* figure 6.3, b) l'ensemble de ces outils, puis réaliser une dilution. En-

1. <https://lium-cloud.univ-lemans.fr/index.php/s/CoS5dStB83FRydx>

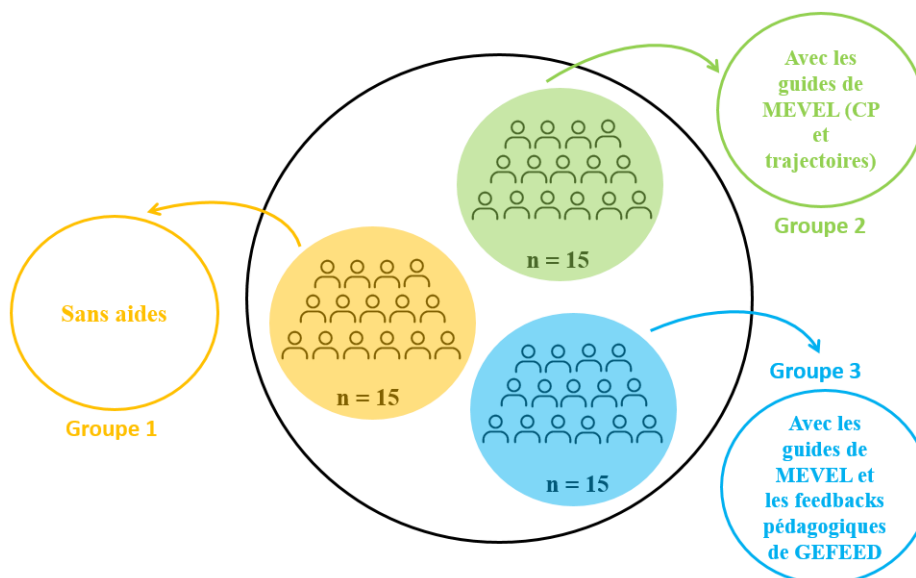


FIGURE 6.2 – Les différents groupes créés dans le cadre de l’expérimentation

suite, les participants sont invités à changer de scène afin de réaliser quatre dilutions. Pour les groupes 2 et 3, les trois premières dilutions sont réalisées avec les guides et aides spécifiques à chaque groupe. Les participants ne reçoivent aucune aide ou guide à l’essai 4 peu importe le groupe auquel ils appartiennent. L’objectif ici est de mesurer l’impact sur l’apprentissage des aides et des guides reçus par les groupes 2 et 3. La durée de cette expérience n’était pas limitée dans le temps et l’utilisateur était libre de s’arrêter quand il le souhaitait. Après l’expérimentation, les candidats ont rempli trois questionnaires respectivement sur : (i) l’utilisabilité des systèmes proposés (ii), l’auto-évaluation des compétences et (iii), le respect des séquences lors de la réalisation du protocole.

Durant l’expérimentation, le système a enregistré pour tous les groupes, le temps mis pour réaliser la dilution. La durée de chaque étape, la durée du niveau d’une compétence (bon, moyen et mauvais), les mouvements ainsi que les CP (séquences) des participants sont mémorisés pour les groupes 2 et 3 uniquement. En effet, le groupe 1 ne dispose pas des fonctionnalités du système MEVEL. La durée du niveau d’une compétence correspond au temps pendant lequel l’apprenant respecte les conditions d’un niveau de compétence. Par exemple, pendant une étape, on mémorise le fait que l’apprenant tient correctement la pipette à l’horizontale pendant 4 secondes. On dit alors que la durée du niveau « bon » de la compétence « pipette à l’horizontale » est de 4 secondes durant cette étape. En plus des informations relevées par le système, nous avons enregistré les vidéos de l’activité de l’apprenant en EV au quatrième essai c’est-à-dire l’essai durant lequel aucun groupe ne

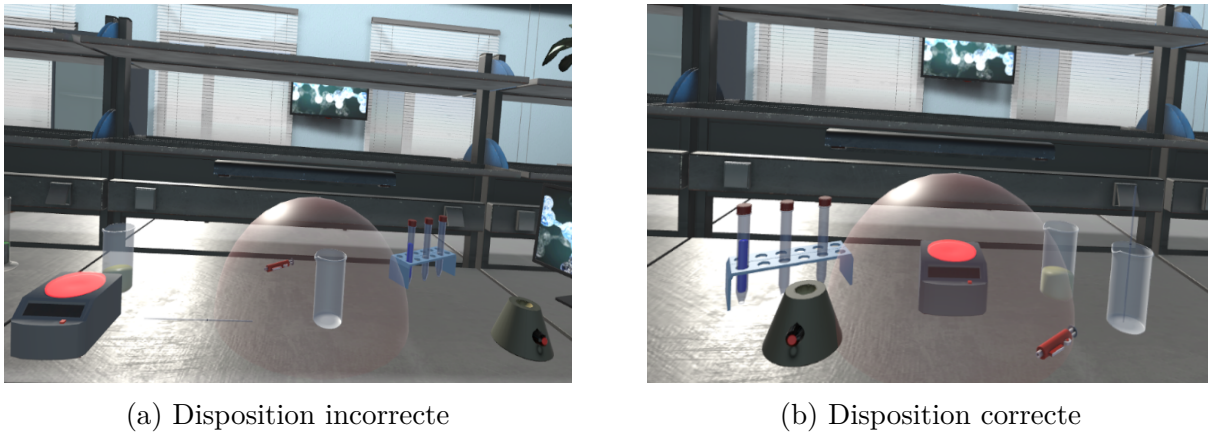


FIGURE 6.3 – Dispositions des éléments nécessaires à la réalisation d'une dilution

reçoit d'aides ou d'assistances. Ces vidéos ont permis à deux experts d'évaluer la tâche des apprenants via un questionnaire.

6.3 Résultats

45 personnes ont participé à l'expérimentation. Elles sont issues de milieux différents (22 étudiants en biologie et 23 en informatique) et sont âgées de 17 à 25 ans. Ces personnes ont été réparties en 3 groupes de façon aléatoire en termes de profil. Après l'expérimentation, il apparaît que le groupe avec le plus de participants ayant de l'expérience en RV est le groupe 1 (9), suivi par le groupe 2 (8) et le groupe 3 (6). Les participants sont des étudiants ayant répondu présents à un appel à volontaire lancé à l'IUT de Laval dans les départements informatique et biologie. Les sessions d'entraînement ont été correctement réalisées et terminées par tous les participants. De plus, tous les participants ont réussi à réaliser les 4 dilutions du protocole expérimental.

6.3.1 Démarche d'analyse statistique

Nous avons suivi une démarche d'analyse statistique afin de vérifier l'existence d'une différence significative en intergroupe et en intragroupe. Nous utilisons les tests de Shapiro-Wilk et D'Agostino-Pearson pour vérifier que les distributions des données obtenues suivent ou non une loi normale avec un risque alpha (α) supérieur à 5% (0.05) dans les deux cas. Le test de Shapiro-Wilk est particulièrement adapté pour les petits effectifs ($n \leq 50$) (HANUSZ *et al.*, 2016). Le test D'Agostino-Pearson est utilisé en complément du

test Shapiro-Wilk, car comparé à ce dernier, le test D'Agostino-Pearson est peu sensible à la présence d'« ex-aequo » dans les données². Nous réalisons alors des tests paramétriques lorsque la distribution des données suit une loi normale (Gaussienne), et des tests non paramétriques dans le cas contraire. Lorsque les tests de Shapiro-Wilk et D'Agostino-Pearson ont des résultats opposés, les tests paramétriques et non paramétriques sont réalisés. À la suite de ces tests, nous réalisons des analyses inter et intragroupes.

Analyse intergroupe Dans le cadre de l'analyse intergroupe, nous utilisons l'*ANOVA* (*ANalysis Of VAriance*) sur les trois groupes lorsque les données suivent la loi normale. L'*ANOVA* a pour objectif de déterminer si les moyennes des distributions sont égales (H_0) ou non (hypothèse alternative (H_1))³. Si H_0 est vérifiée, un *Pairwise T-test* est effectué, afin d'évaluer s'il y a des différences significatives entre les groupes pris deux à deux. Cependant, lorsque la distribution de la population ne suit pas une loi normale, le test de *Kruskal-Wallis*, contrepartie non paramétrique du test d'*ANOVA* (HECKE, 2012) est réalisé sur les trois groupes. L'hypothèse H_0 de ce test indique que les médianes de chaque groupe sont égales. Si H_0 est vérifiée, alors on évalue si les distributions sont égales (H_0) via à un test de *Wilcoxon-Mann-Whitney* (McKIGHT *et al.*, 2010) sur les groupes pris deux à deux.

Analyse intragroupe En ce qui concerne l'analyse intragroupe, si la distribution de la population suit une loi normale, le test de *Student* sur deux échantillons est réalisé, l'hypothèse H_0 de ce test spécifie que la moyenne des deux populations est égale. À contrario, si la distribution de la population ne suit pas une loi normale, le test *Wilcoxon Signed-Rank Test*, la contrepartie non paramétrique du test de *Student* paire à paire, est réalisée. Il a pour objectif de tester si les distributions de deux paires d'échantillons sont égales ou non. Son hypothèse H_0 indique que la médiane de deux échantillons est égale.

Quel que soit le test considéré, le rejet ou la validation de l'hypothèse H_0 ne peut servir de preuve formelle quant à la validité et la reproductibilité des résultats (HALSEY *et al.*, 2015). Cette reproductibilité ne peut être envisagée que dans le cadre des conditions de l'expérimentation menée et la généralisation des résultats ne peut être que supposée. En effet, « lorsque l'hypothèse nulle est rejetée, le résultat est considéré comme significatif et n'est pas dû à un phénomène aléatoire. Cependant, ce n'est pas une preuve formelle

2. <https://www.normalesup.org/~carpentier/Notes/Normalite/Dago-test.html>

3. <https://perso.univ-rennes1.fr/valerie.monbet/ExposesM2/2013/anova.pdf>

que la différence significative obtenue entre les échantillons soit liée à leur condition expérimentale respective identifiée par le chercheur. » (COULAND, 2020). Dans la suite de ce chapitre, nous ne présenterons pas les tests que nous avons réalisés sur la distribution de la population. Cependant, l'intégralité des résultats de ces tests est accessible dans l'annexe L. Pour chaque analyse, les données sont présentées sous forme de diagrammes en boîte (boîtes à moustaches). La figure 6.4 décrit les principaux éléments observables d'une boîte à moustache.

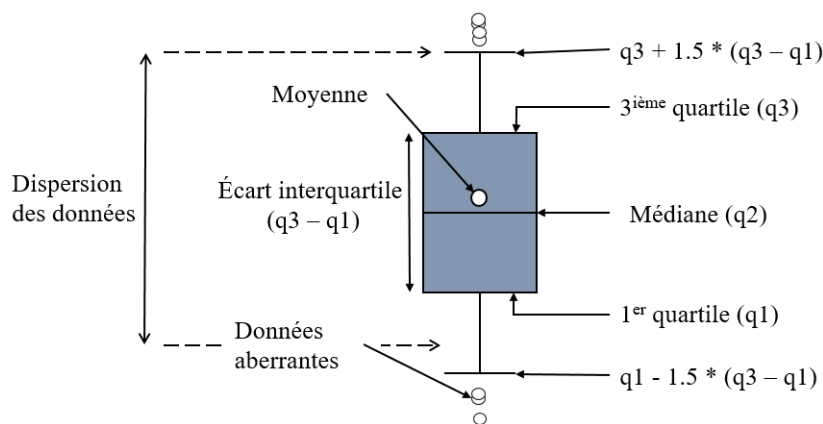


FIGURE 6.4 – Description d'une boîte à moustache

6.3.2 Temps de réalisation de la tâche

Cette section présente les résultats sur les temps mis par les participants pour réaliser la tâche, suivis par leur interprétation. L'objectif est de vérifier s'il y a une amélioration (*i.e.* diminution) du temps de réalisation de la tâche. Le tableau 6.2 présente les moyennes et les écarts-types des temps (en secondes) mis par les participants pour réaliser la tâche pour chacun des 4 essais. On constate que le temps moyen du groupe 1 reste le plus petit sur l'ensemble des essais. Cependant, les moyennes des participants du groupe 2 et 3 baissent nettement, au point d'atteindre pratiquement le même temps moyen que celui du groupe 1 (*cf.* figure 6.5). En ce qui concerne l'écart-type, celui du groupe 1 (suivi de très près par le groupe 2) est le plus petit au premier essai. L'écart-type du groupe 3 est le plus petit au deuxième et au quatrième essai, tandis que celui du groupe 2 est le plus petit à l'essai 3.

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
G1 (sans aides)	145.6	31.27	120.33	27.65	109.93	24.66	111.06	21.07
G2 (guides visuels)	170.26	31.86	129.46	22.3	112.26	16.2	116.06	18.22
G3 (guides visuels + feedbacks)	178.26	45.69	136.4	21.95	117	18.02	113.33	14.92

TABLE 6.2 – Moyennes (\bar{x}) et écarts-types (σ) du temps (en secondes) utilisé pour réaliser la tâche

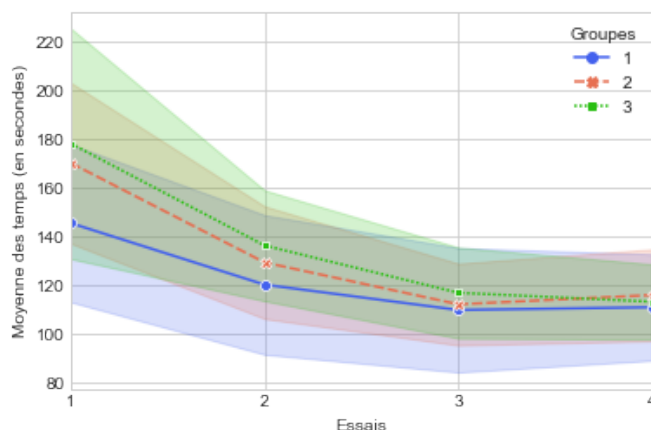


FIGURE 6.5 – Moyennes et écarts-types du temps (en secondes) utilisé pour réaliser la tâche

Analyse intergroupe Les résultats de l'analyse intergroupe sont présentés dans la figure 6.6. Pour chaque essai, les données des trois groupes sont présentées successivement. Concernant la durée, on remarque que l'écart interquartile et la dispersion du groupe 3 baissent progressivement d'un essai à un autre jusqu'à être plus petits que l'ensemble des groupes au quatrième essai. Le groupe 1 est celui ayant la médiane la plus basse sur tous les essais, sauf au quatrième essai où le groupe 3 l'emporte. En ce qui concerne l'analyse statistique, on constate une différence significative à l'essai 1 sur les trois groupes (tableau 6.3) au profit du groupe 1.

Analyse intragroupe La figure 6.7 présente les résultats intragroupes. La médiane diminue progressivement de l'essai 1 à 3, puis augmentent légèrement au dernier essai

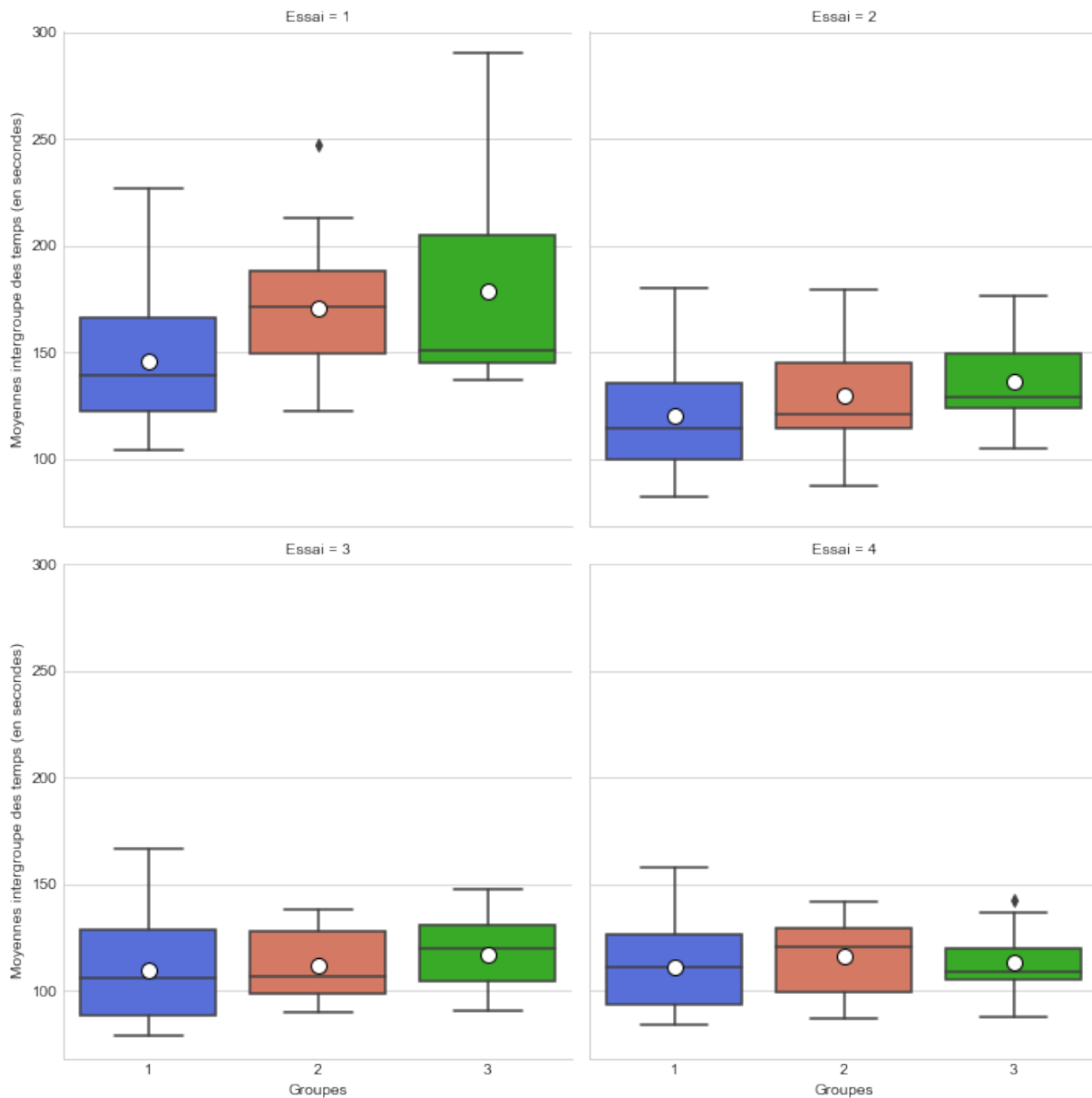


FIGURE 6.6 – Moyennes intergroupes des durées de la tâche (en secondes)

pour les groupes 1 et 2. En ce qui concerne le groupe 3, la médiane, l'écart interquartile ainsi que de la dispersion des données baissent progressivement sur l'ensemble des essais. On constate également qu'il y a peu de données aberrantes sur l'ensemble des essais, c'est-à-dire aux essais 1 et 4 pour les groupes 2 et 3. Des résultats significatifs ont été obtenus sur l'ensemble des essais, pris deux à deux, pour tous les groupes, sauf entre les essais 3 et 4 pour tout les groupes, et entre les essais 2 et 4 pour le groupe 1 (*cf.* tableau

		Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
ANOVA ($p < 0.05$)			0.221	0.637	0.769
Pairwise T-test ($p < 0.05$)	G1 - G2				
	G1 - G3				
	G2 - G3				
Kruskal Wallis ($p < 0.05$)		0.05			
Pairwise Mann-Whitney ($p < 0.05$)	G1 - G2	0.04			
	G1 - G3	0.034			
	G2 - G3	1			

TABLE 6.3 – Résultats des tests statistiques en intergroupe (moyenne des temps utilisés pour réaliser la tâche)

6.4).

		T Test ($p < 0.05$)	Wilcoxon Signed-Rank ($p < 0.05$)
Essai 1-2	G1	$2.19e^{-4}$	
	G2	$1.02e^{-6}$	
	G3		0.0023
Essai 1-3	G1	$3.95e^{-6}$	
	G2	$5.94e^{-6}$	
	G3		$8.03e^{-4}$
Essai 1-4	G1	$3.18e^{-5}$	$7.99e^{-4}$
	G2	$1.14e^{-5}$	
	G3		$6.54e^{-4}$
Essai 2-3	G1	$8.1e^{-3}$	
	G2	$8.92e^{-3}$	
	G3	0.013	
Essai 2-4	G1	0.078	0.139
	G2	0.035	
	G3	0.001	0.0021
Essai 3-4	G1	0.641	
	G2		0.396
	G3	0.417	

TABLE 6.4 – Résultats des tests statistiques en intragroupe (moyenne des temps utilisés pour réaliser la tâche)

Interprétations Les participants du groupe 1 ont pris significativement moins de temps, en moyenne, pour réaliser la tâche à l'essai 1 comparée aux groupes 2 et 3. Ce constat

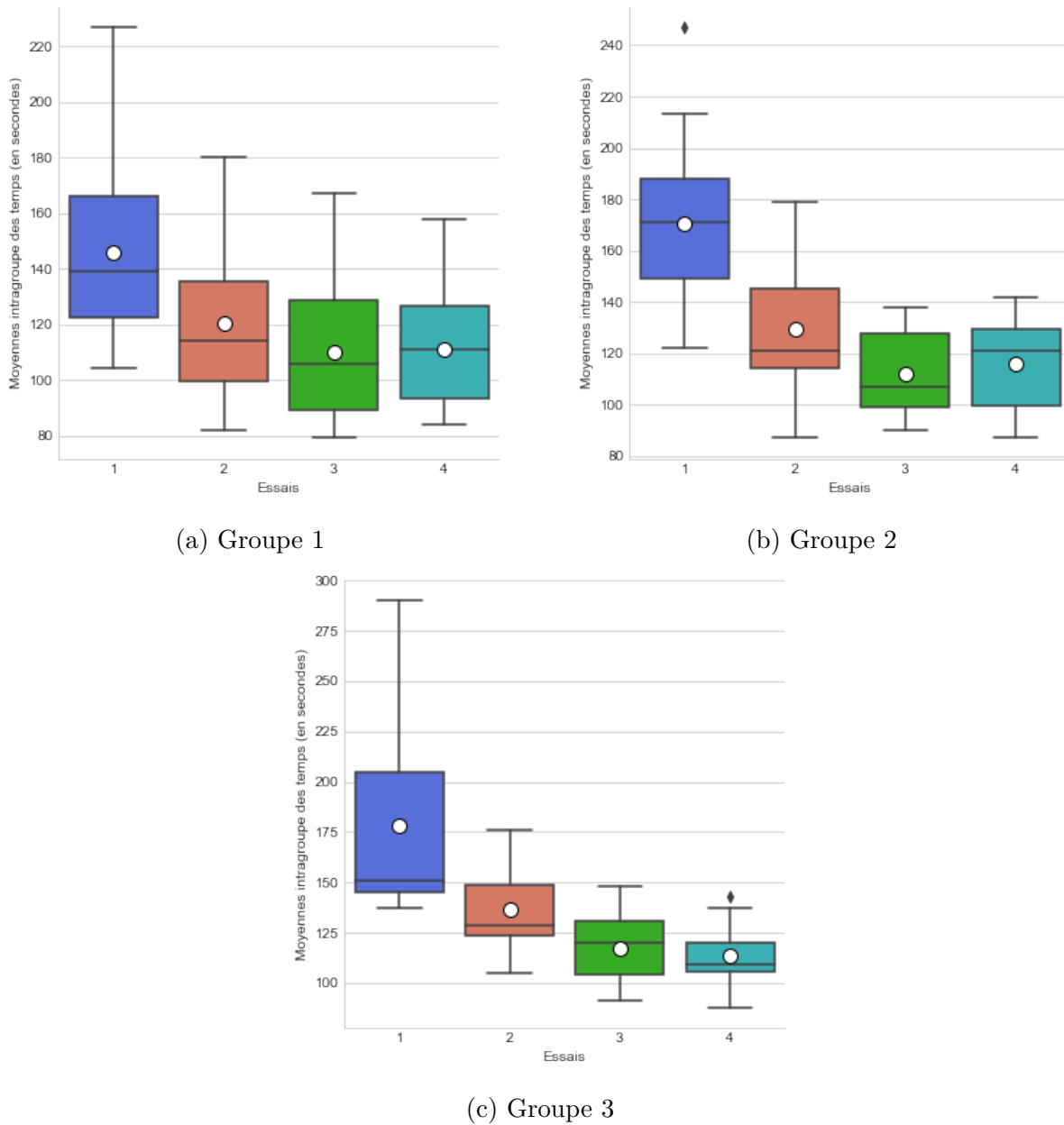


FIGURE 6.7 – Moyennes intragroupes des durées de la tâche (en secondes)

peut être dû au fait que (i) les participants des groupes 2 et 3 utilisent pour la première fois les aides et guides liés à leurs groupes respectifs, donc prennent plus de temps à appréhender ces informations supplémentaires par rapport au groupe 1 et (ii), le groupe 1 contient le plus de participants ayant une expérience en RV. Les moyennes des temps des groupes 2 et 3 se rapprochent de celle du groupe 1 au bout de deux essais. En outre, les

groupes 1 et 2 voient leur moyenne légèrement augmenter au quatrième essai, contrairement au groupe 3 qui continue de progresser. De manière générale, le groupe 3 obtient de bien meilleurs résultats en termes d'écart-type et d'écart interquartile, ces derniers diminuant sur l'ensemble des 4 essais. Ainsi, par rapport aux autres groupes, le groupe 3 semble être celui qui réussit le mieux à homogénéiser les résultats de ces participants, tout en les faisant progresser afin d'atteindre un niveau proche du groupe 1 (moyenne) ou le dépassant (médiane, écart-type, écart interquartile et dispersion). Cependant l'analyse statistique ne montre pas que cette dernière comparaison n'est pas due au hasard. Il aurait été toutefois intéressant d'ajouter des essais supplémentaires afin de voir si le groupe 3 peut encore poursuivre sa progression de manière significative, contrairement aux groupes 1 et 2. Néanmoins, il est difficile, à ce stade, de voir si l'amélioration du temps peut correspondre à une amélioration dans la réalisation des gestes et l'exécution du protocole.

6.3.3 Compétences gestuelles

Dans cette section, nous analysons les résultats de trois compétences liées à l'activité de dilution : (i) le tube et la pipette sont tenus à la verticale (étape 4), (ii) la pipette est tenue à l'horizontale (étape 5 à 7) et (iii) la pipette est tenue à la verticale (étape 8). Ces compétences sont issues des besoins d'observations des enseignants extraits des interviews réalisées. L'objectif est de vérifier si les aides et guides fournis aux participants contribuent à l'amélioration des gestes réalisés. Ces compétences sont évaluées, selon différents niveaux (bon, moyen et mauvais), à travers le ratio entre la durée de l'étape et la durée du niveau de la compétence durant l'étape. Pour rappel, la durée du niveau d'une compétence durant une étape correspond au temps pendant lequel l'apprenant respecte les métriques (cinématiques, géométriques, temporelles) liées au niveau (ici bon, moyen ou mauvais) du geste réalisé et préalablement définies par l'expert. Les données présentées ici ne concernent que les groupes 2 et 3, ainsi que les essais 1 à 3. Le groupe 1 ne disposant pas des fonctionnalités de MEVEL, on ne peut enregistrer les informations nécessaires à l'évaluation de ces compétences pour ce groupe, car on ne peut discerner aisément les étapes et actions telles qu'elles sont définies en un temps raisonnable par une segmentation manuelle. De plus, afin d'évaluer l'impact des aides et guides fournis, l'ensemble des groupes ne reçoit aucune aide ou guide à l'essai 4, ce qui rend impossible d'enregistrer les informations nécessaires à l'évaluation des compétences durant cet essai. Les niveaux des compétences tels que définis dans la section 6.1 sont codés comme suit : N1 « bon », N2

« moyen » et N3 « mauvais ». Avant de présenter les résultats obtenus, nous expliquons dans la section suivante la méthode utilisée pour le calcul du ratio permettant d'évaluer les compétences gestuelles.

6.3.3.1 Calcul du ratio évaluant les compétences gestuelles

Le calcul du ratio permettant d'évaluer les compétences selon les différents niveaux (bon, moyen et mauvais) considère deux facteurs : (i) le nombre d'OI impliqué dans la réalisation de l'étape et (ii) le nombre d'étapes durant lesquelles la compétence est évaluée. La durée du niveau de la compétence durant une étape est divisée par celle de l'étape afin d'obtenir un ratio. Cependant, lorsque plusieurs OI sont impliqués, comme dans la compétence « tube et pipette à la verticale », on réalise la somme entre les ratios de chacun des OI considérés. De même, lorsque plusieurs étapes sont nécessaires pour évaluer la compétence, une addition est réalisée entre les ratios des différentes étapes. Enfin le ratio obtenu est divisé par le nombre d'OI et/ou d'étapes utilisés pour son calcul. Cette méthode est utilisée pour le calcul de toutes les compétences gestuelles évaluées dans cette partie et permet d'obtenir des ratios compris entre 0 et 1. La signification du ratio dépend du niveau de compétence considéré. Cependant, dans tous les cas, lorsque durant une étape, l'apprenant respecte les propriétés spatiales et temporelles définies par l'utilisateur final, le ratio appartenant à la catégorie des gestes « bons » sera le plus haut. Dans notre contexte, par exemple, le niveau « bon » sera plus élevé que celui du niveau « mauvais » si l'apprenant respecte le plus longtemps ces propriétés.

6.3.3.2 Le tube et la pipette sont tenus à la verticale (étape 4)

Cette section étudie les résultats de la compétence « tube et pipette à la verticale ». Le geste lié à cette compétence se produit durant l'étape 4 lors de l'exécution de la tâche. Le tableau 6.5 présente les moyennes et les écarts-types des ratios de la compétence sur les essais 1, 2 et 3 pour les groupes 2 et 3.

La moyenne du niveau « bon » (N1) est la plus haute sur les essais 1 à 3 avec une augmentation au dernier essai pour le groupe 3, tandis que la moyenne du niveau « mauvais » (N3) suit une tendance inverse. Il faut noter toutefois que la moyenne du niveau « mauvais » (N3) reste la plus grande sur l'ensemble des essais, pour l'ensemble des groupes, sauf sur le dernier essai du groupe 3. En outre, l'écart-type du niveau « bon » (N1) du groupe 2 est le plus petit sur l'ensemble des essais, excepté à l'essai 2 où les écarts-types des deux groupes sont égaux.

	Essai 1				Essai 2				Essai 3			
	G2		G3		G2		G3		G2		G3	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
N1	0.29	0.22	0.36	0.25	0.28	0.25	0.36	0.25	0.27	0.25	0.49	0.34
N2	0.16	0.1	0.23	0.17	0.19	0.14	0.23	0.12	0.18	0.16	0.17	0.16
N3	0.55	0.25	0.41	0.3	0.53	0.25	0.41	0.22	0.55	0.3	0.34	0.27

TABLE 6.5 – Moyennes (\bar{x}) et écarts-types (σ) des ratios de la compétence « tube et pipette à la verticale »

Analyse intergroupe La figure 6.8 présente les résultats intergroupes. Pour chaque essai, les données des deux groupes sont présentées les uns à la suite des autres.

Pour le niveau « bon » de la compétence, on remarque que la médiane du groupe 3 est la plus grande sur les essais 1 à 3. En outre, les écarts interquartiles sont inférieurs à l'essai 1, identiques à l'essai 2 et bien supérieurs à l'essai 3 par rapport au groupe 2 pour ce même niveau. En termes de dispersion pour le niveau « bon », le groupe 3 a toujours une dispersion plus grande. Pour le niveau « mauvais », la médiane et la dispersion du groupe 3 sont toujours en dessous de celle du groupe 2. On note toutefois un écart interquartile plus grand aux essais 1 et 3 pour le groupe 3. Une différence significative est obtenue à l'essai 3 pour le niveau « bon » (N1) lorsque la distribution suit la loi normale (tableau 6.6).

	Essai 1			Essai 2			Essai 3		
	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Pairwise T-test ($p < 0.05$)	0.415		0.156	0.35	0.56	0.241	0.021		
Pairwise Mann- Whitney ($p < 0.05$)		0.254		0.28			0.1	0.967	0.073

TABLE 6.6 – Résultats des tests statistiques en intergroupe pour la compétence « tube et pipette à la verticale »

Analyse intragroupe La figure 6.9 présente les résultats intragroupes. Pour le niveau « bon » de la compétence, on observe une augmentation progressive de la médiane sur l'ensemble des essais pour le groupe 3 mais aussi une augmentation de l'écart interquartile

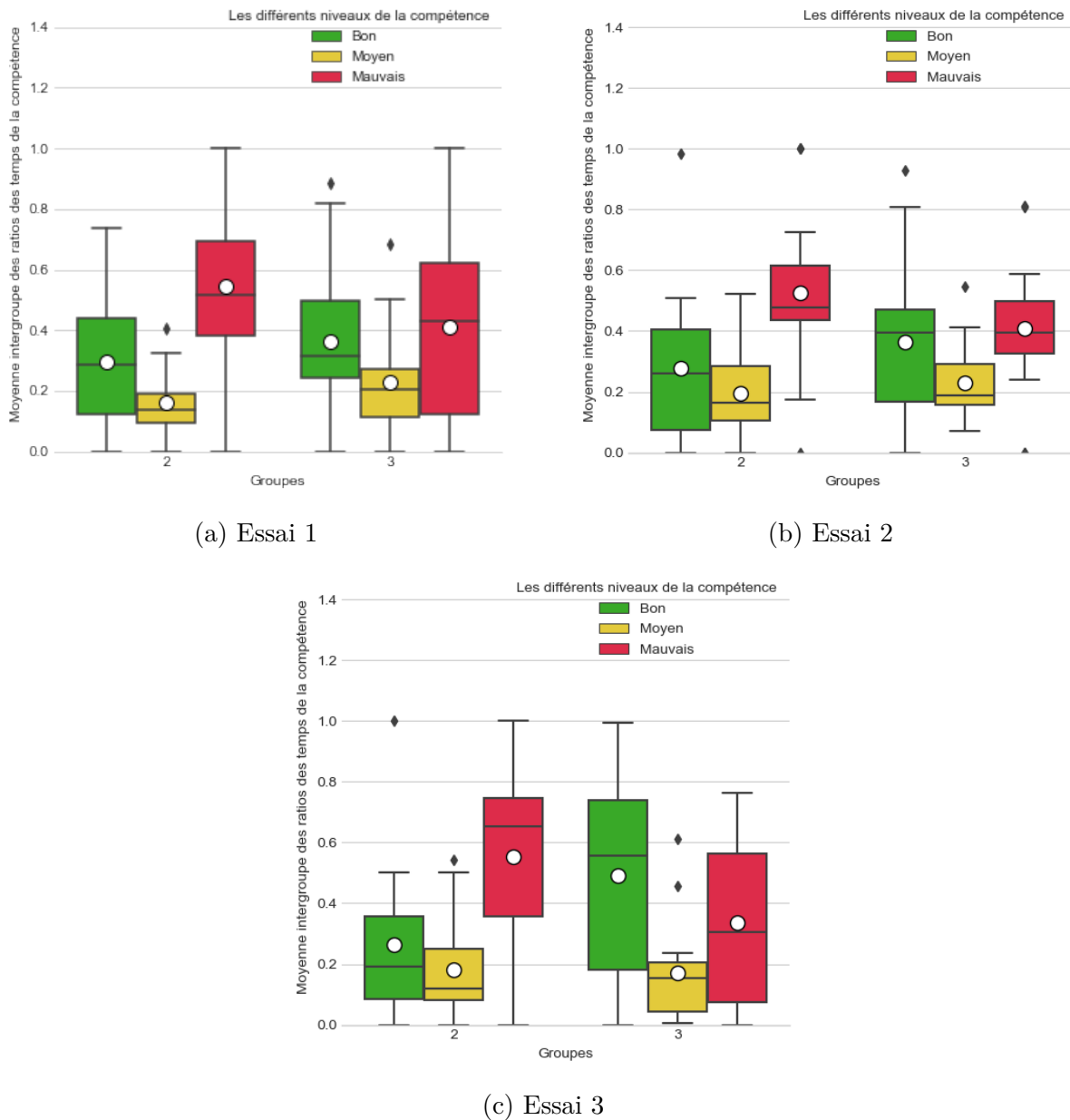


FIGURE 6.8 – Moyennes intergroupes des ratios pour la compétence « tube et pipette à la verticale »

et de la dispersion, tandis que la médiane et la dispersion baissent progressivement sur l'ensemble des essais pour le groupe 2. Il est étonnant de constater, pour le niveau « mauvais », une diminution de l'écart interquartile et de la dispersion à l'essai 2 puis une augmentation à l'essai 3 pour les deux groupes. Les résultats obtenus ne présentent, dans l'ensemble, pas de différences significatives (*cf.* tableau 6.7).

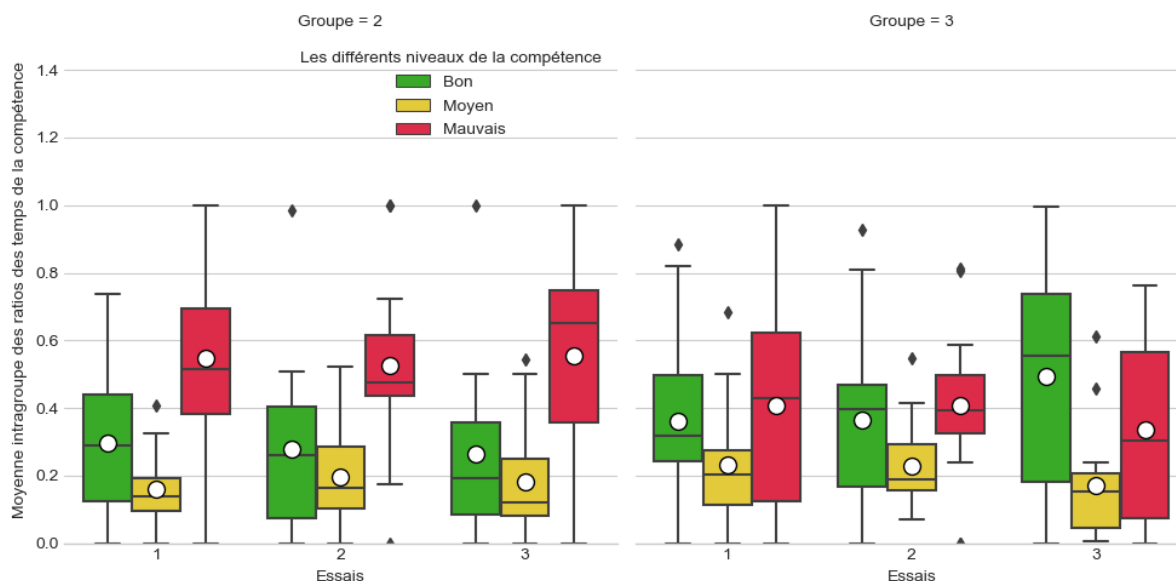


FIGURE 6.9 – Moyennes intragroupes des ratios pour la compétence « tube et pipette à la verticale »

		T Test ($p < 0.05$)			Wilcoxon Signed-Rank ($p < 0.05$)		
		N1	N2	N3	N1	N2	N3
Essai 1-2	G2	0.813	0.269	0.752	0.7		
	G3	0.958		0.983		0.776	
Essai 1-3	G2			0.897	0.382	0.875	
	G3	0.212		0.349		0.394	
Essai 2-3	G2		0.834	0.748	0.972	0.875	
	G3	0.21		0.33		0.139	

TABLE 6.7 – Résultats des tests statistiques en intragroupe pour la compétence « tube et pipette à la verticale »

Interprétations Les participants des groupes ayant le plus correctement (niveau « bon ») tenu le tube et la pipette à la verticale en moyenne, sont ceux du groupe 3 à tous les essais. Le groupe 2 est celui qui tient le moins correctement (niveau « mauvais ») le tube et la pipette à la verticale en moyenne comparé au groupe 3. Cependant, les dispersions et les écarts interquartiles ne montrent pas une homogénéité des résultats pour le niveau « bon » et le niveau « mauvais ». Un seul résultat significatif a été obtenu à l'essai 3 en intergroupe ce qui contribue à confirmer l'*Hypothèse 3* indiquant que les participants du groupe 3 acquièrent mieux cette compétence par l'intermédiaire des aides fournies par le

système GEFEED. La différence intergroupe n'étant obtenue qu'à l'essai 3, plus d'essais semblent nécessaires pour confirmer ou infirmer ce point, ainsi que dégager une tendance claire sur la progression en intragroupe pour le groupe 3.

6.3.3.3 Pipette à l'horizontale (étape 5 à 7)

Cette section présente les résultats de la compétence « tube à la verticale ». Le geste lié à cette compétence se produit durant l'étape 5 à 7 lors de l'exécution de la tâche. Le tableau 6.8 présente les moyennes et les écarts-types des ratios pour la compétence sur les essais 1, 2 et 3. La moyenne du niveau « bon » (N1) est la plus haute sur les essais 1 à 3 pour le groupe 3 comparée à celle du groupe 2. Si on compare le niveau « mauvais » et le niveau « bon » au sein du groupe 3, on constate que la moyenne du niveau « mauvais » (N3) est plus petite que celle du niveau « bon » à partir de l'essai 2. En outre, la moyenne du niveau « mauvais » (N3) reste grande que celle du niveau « bon » sur l'ensemble des essais pour le groupe 2. Les écarts-types du niveau « bon » (N1) du groupe 2 sont les plus petits sur l'ensemble des essais.

	Essai 1				Essai 2				Essai 3			
	G2		G3		G2		G3		G2		G3	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
N1	0.16	0.27	0.29	0.29	0.22	0.29	0.44	0.39	0.15	0.24	0.42	0.36
N2	0.17	0.22	0.21	0.16	0.14	0.18	0.21	0.23	0.15	0.19	0.18	0.2
N3	0.67	0.41	0.5	0.4	0.64	0.39	0.35	0.4	0.7	0.36	0.4	0.39

TABLE 6.8 – Moyennes (\bar{x}) et écarts-types (σ) des ratios pour la compétence « pipette à l'horizontale »

Analyse intergroupe Les résultats intergroupes sont présentés dans la figure 6.10. Pour chaque essai, les données des deux groupes sont présentées en parallèle. On constate que la médiane du niveau « bon » du groupe 3 est supérieure sur tous les essais cependant, la dispersion et l'écart interquartile sont bien plus grands. La médiane du niveau « mauvais » du groupe 3 est la plus basse sur l'ensemble des essais comparée à celle du groupe 2, mais la dispersion et l'écart interquartile sont très importants pour les deux groupes.

Au moins, la moitié des participants n'ont jamais atteint le niveau « bon » sur les trois essais pour le groupe 2, et au moins un quart sur les essais 1 et 3 pour le groupe 3.

Un résultat significatif a été observé à l'essai 3 pour le niveau « bon » lorsque la distribution suit la loi normale ainsi qu'au niveau « mauvais » à l'essai 2 (tableau 6.9).

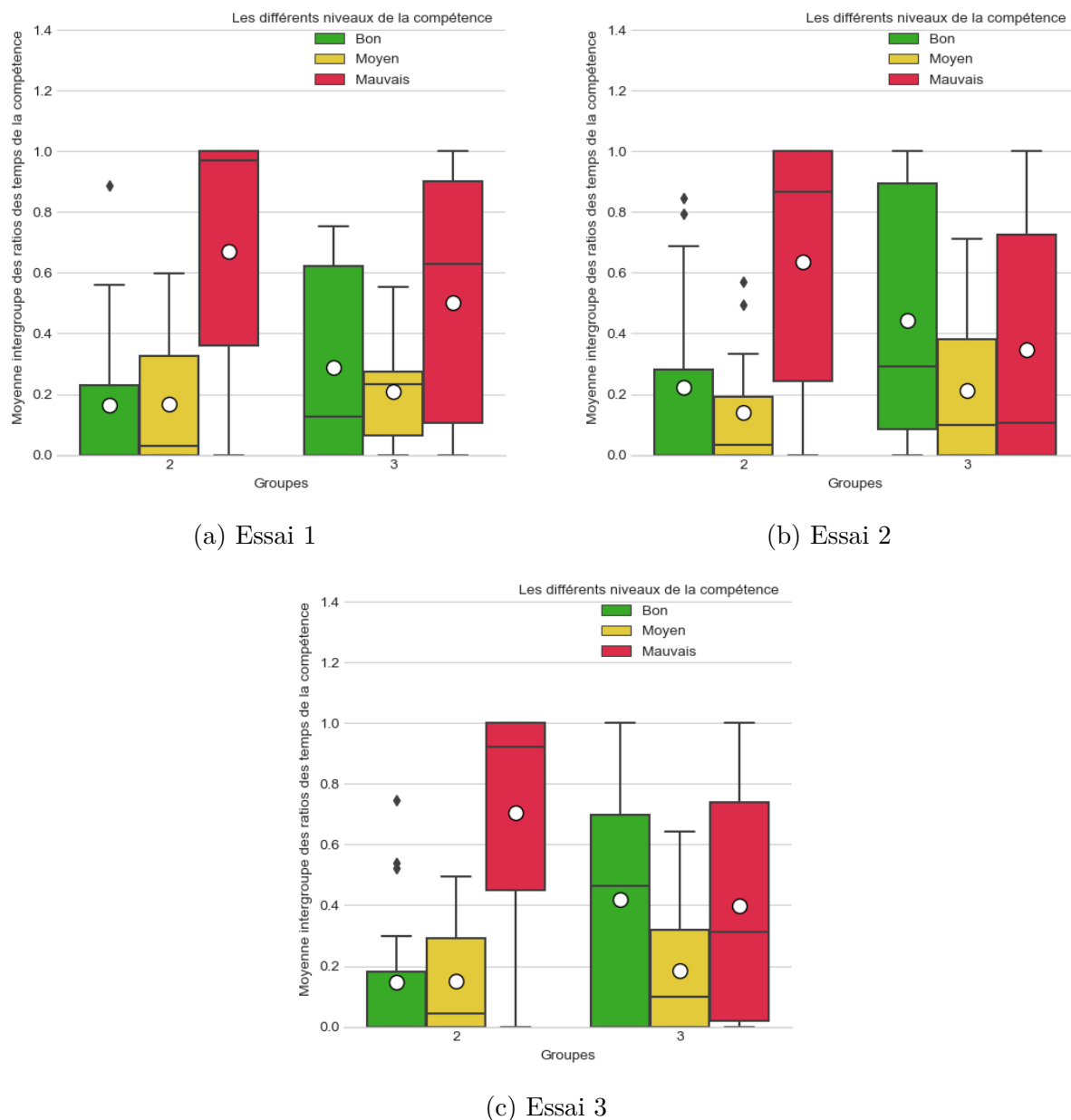


FIGURE 6.10 – Moyennes intergroupes des ratios pour la compétence « pipette à l'horizontale »

Analyse intragroupe La figure 6.11 présente les résultats intragroupes. On observe que les résultats sont dans l'ensemble stables pour le groupe 2 sur tous les essais et tous

	Essai 1			Essai 2			Essai 3		
	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Pairwise T-test ($p < 0.05$)	0.173	0.5					0.003	0.692	
Pairwise Mann- Whitney ($p < 0.05$)	0.143	0.375	0.351	0.081	0.479	0.043	0.057	0.7	0.079

TABLE 6.9 – Résultats des tests statistiques en intergroupe pour la compétence « pipette à l'horizontale »

les niveaux sauf pour la dispersion. En ce qui concerne le groupe 3, la médiane du niveau « mauvais » baisse fortement à l'essai 2 puis augmente à l'essai 3, tandis que la médiane du niveau « bon » augmente sur l'ensemble des essais avec un écart interquartile important. La dispersion augmente aussi et demeure, dans tous les cas, importante, pour les niveaux « bon » et « mauvais ». Les résultats obtenus n'indiquent pas de différences significatives pour tous les groupes (*cf.* tableau 6.10).

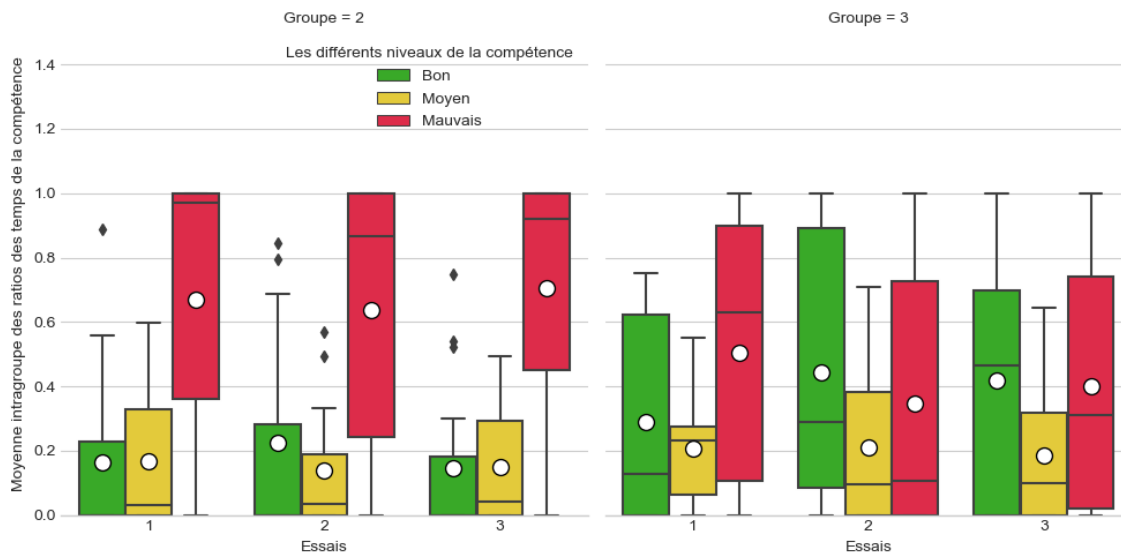


FIGURE 6.11 – Moyennes intragroupes des ratios pour la compétence « pipette à l'horizontale »

		T Test ($p < 0.05$)			Wilcoxon Signed-Rank ($p < 0.05$)		
		N1	N2	N3	N1	N2	N3
Essai 1-2	G2				0.092	0.767	0.674
	G3		0.972		0.157	0.861	0.182
Essai 1-3	G2		0.815		0.441	0.959	0.798
	G3		0.581		0.154	0.582	0.388
Essai 2-3	G2				0.236	0.678	0.441
	G3		0.661		0.432	0.582	0.241

TABLE 6.10 – Résultats des tests statistiques en intragroupe pour la compétence « pipette à l’horizontale »

Interprétations Les participants du groupe 2 ont de plus mauvaises performances sur l’ensemble des essais par rapport au groupe 3, avec une forme de stabilité quel que soit le niveau considéré. Le niveau « bon » n’est pas atteint par au moins la moitié des participants du groupe 2. Le groupe 3 est celui obtenant les meilleurs résultats en ce qui concerne le niveau « bon » en termes de moyenne, de médiane et de progression sur tous les essais. Ces résultats suggèrent que les participants du groupe 3 réalisent mieux les gestes en moyenne, dans cette étape, au bout de trois essais. Ce qui semble correspondre à une amélioration des gestes réalisés grâce aux feedbacks pédagogiques fournis par le système GEFEED. Cependant, aucune conclusion ne peut être faite relativement à la progression intragroupe. L’homogénéité des résultats pour chaque essai du groupe 3 est critiquable et la présence importante du niveau « mauvais » sur chaque essai est aussi à noter. Une analyse avec un plus grand nombre d’essais serait une nouvelle fois nécessaire pour confirmer ces premières observations et étudier la progression. En outre, nous avons constaté que les apprenants détournaient naturellement le regard de la pipette, afin de prendre le second tube à essai, situé sur leur gauche, à cette étape. Ceci pourrait expliquer les mauvais résultats sur l’ensemble des groupes relatifs à cette compétence.

6.3.3.4 Pipette à la verticale (étape 8)

Cette section présente les résultats de la compétence « pipette à la verticale ». Le geste lié à cette compétence se produit durant l’étape 8. Le tableau 6.11 présente les moyennes et les écarts-types des ratios pour la compétence sur les essais 1 à 3 pour les groupes 2 et 3. La moyenne du niveau « bon » (N1) est la plus haute sur tous les essais pour le groupe 3 comparée à celle du groupe 2. La moyenne du niveau « mauvais » (N3) est la

plus grande sur l'ensemble des essais pour les deux groupes. Les écarts-types du niveau « bon » (N1) du groupe 2 sont les plus petits sur l'ensemble des essais.

	Essai 1				Essai 2				Essai 3			
	G2		G3		G2		G3		G2		G3	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
N1	0.07	0.15	0.24	0.28	0.15	0.21	0.22	0.32	0.11	0.2	0.3	0.3
N2	0.19	0.16	0.11	0.08	0.23	0.19	0.09	0.12	0.15	0.15	0.1	0.15
N3	0.74	0.25	0.65	0.33	0.62	0.33	0.69	0.35	0.74	0.26	0.6	0.33

TABLE 6.11 – Moyennes (\bar{x}) et écarts-types (σ) des ratios pour la compétence « pipette à la verticale »

Analyse intergroupe Les résultats intergroupes sont présentés dans la figure 6.12. Pour chaque essai, les données des trois groupes sont présentées successivement. Pour le niveau « mauvais » (N3) et le niveau « bon » (N1) de la compétence, on remarque que la dispersion et l'écart interquartile du groupe 3 sont bien plus grands sur l'ensemble des essais, que ceux du groupe 2. La médiane du niveau « bon » du groupe 3 est supérieure à l'essai 1 et 3 par rapport au groupe 2. Au moins, la moitié des participants n'ont jamais atteint le niveau « bon » sur les trois essais pour le groupe 2, au moins la moitié sur l'essai 1 pour le groupe 3 et un quart sur l'essai 2 pour ce même groupe. On observe des différences significatives dans les résultats à l'essai 2 pour le niveau « moyen » et à l'essai 3 pour le niveau « bon » (tableau 6.12).

	Essai 1			Essai 2			Essai 3		
	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Pairwise T-test ($p < 0.05$)			0.451	0.414		0.547	0.041	0.619	0.062
Pairwise Mann- Whitney ($p < 0.05$)	0.084	0.308	0.632	0.753	0.01	0.356	0.029	0.901	0.158

TABLE 6.12 – Résultats des tests statistiques en intergroupe pour la compétence « pipette à la verticale »

Analyse intragroupe La figure 6.13 présente les résultats intragroupes. On constate une amélioration de la médiane pour le niveau « bon » du groupe 3 entre les essais 1 et 3.

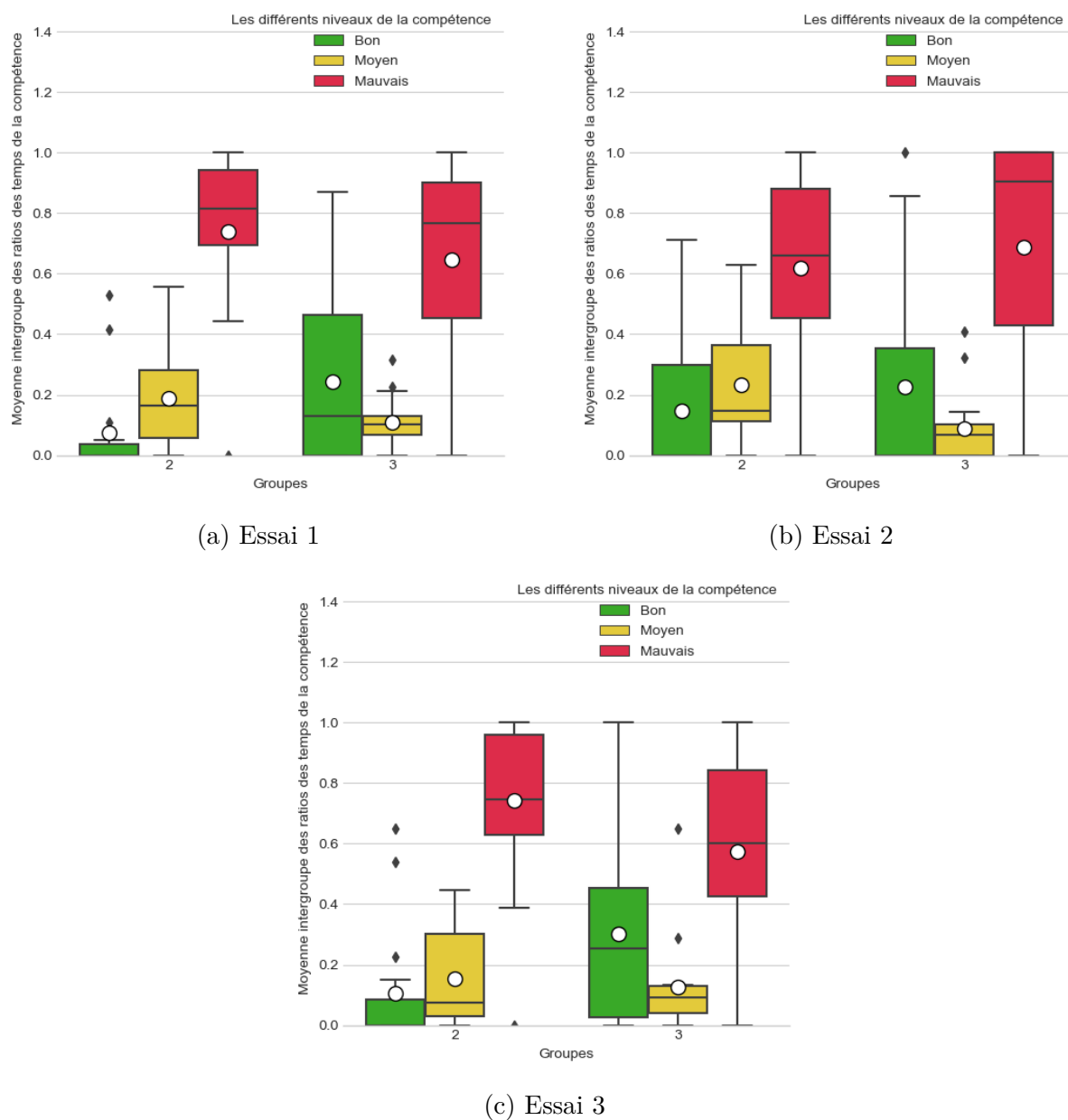


FIGURE 6.12 – Moyennes intergroupes des ratios pour la compétence « pipette à la verticale »

La médiane du groupe 2 pour ce même niveau reste à zéro. En termes d'écart interquartiles et de dispersion, peu d'évolutions sont constatés pour le groupe 3. Le groupe 2 présente une augmentation des dispersions pour l'essai 2.

La médiane du niveau « bon » de la compétence augmente et baisse d'un essai à un autre pour le groupe 2. De même, l'écart interquartile du groupe 2 augmente à l'essai

2 et baisse à l'essai 3. En ce qui concerne le groupe 3, la médiane du niveau « bon » de la compétence croît de l'essai 1 à 3. Tandis que les écarts interquartiles de ce groupe baissent à l'essai 2 et augmentent à l'essai 3. Les résultats obtenus ne présentent pas dans l'ensemble de différences significatives (*cf.* tableau 6.13).

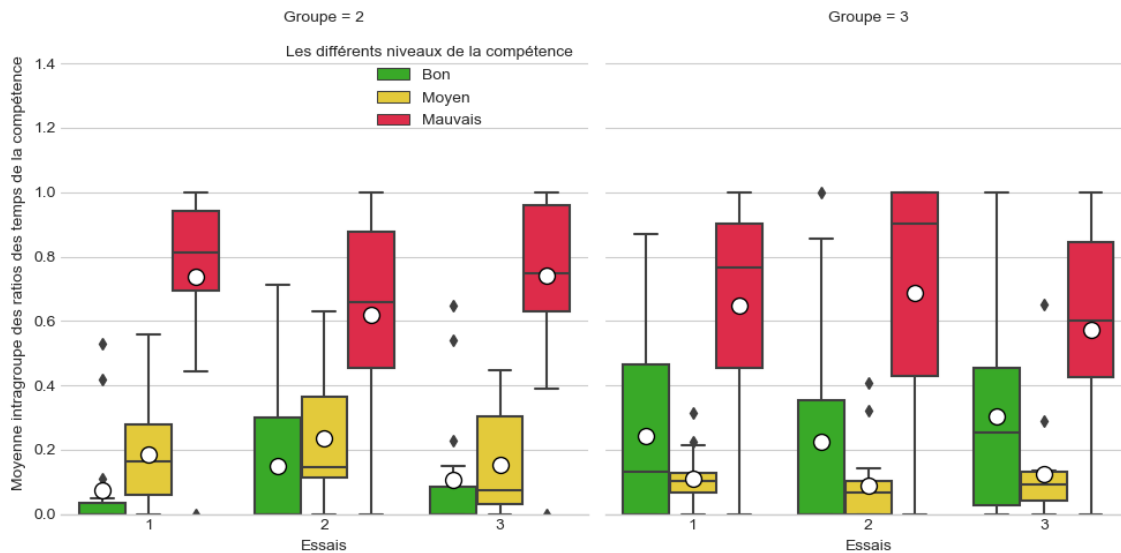


FIGURE 6.13 – Moyennes intragroupes des ratios pour la compétence « pipette à la verticale »

		T Test ($p < 0.05$)			Wilcoxon Signed-Rank ($p < 0.05$)		
		N1	N2	N3	N1	N2	N3
Essai 1-2	G2		0.352		0.313	0.362	0.064
	G3			0.7	0.593	0.272	0.722
Essai 1-3	G2		0.557		0.483	0.394	0.924
	G3	0.537		0.354	0.48	0.972	0.432
Essai 2-3	G2		0.163	0.2	0.593	0.1	0.463
	G3			0.078	0.247	0.421	0.084

TABLE 6.13 – Résultats des tests statistiques en intragroupe pour la compétence « pipette à la verticale »

Interprétations Le groupe 3 obtient de meilleurs résultats (niveau « bon ») en moyenne par rapport au groupe 2 sur l'ensemble des essais. Par ailleurs, le groupe 2 est celui obtenant le plus de mauvaises performances (niveau « mauvais ») en moyenne sur l'ensemble

des essais, la différence étant légère par rapport au groupe 3. De plus, une médiane nulle peut être observée pour le niveau « bon » sur l'ensemble des essais du groupe 2. De nouveau, on constate que : (a) une différence significative est obtenue au dernier essai pour le niveau « bon » entre le groupe 3 et le groupe 2, au profit du groupe 3 (b), une absence de résultats significatifs en termes de progression (c), une grande dispersion et un grand écart interquartile pour les niveaux « bons » et « mauvais » du groupe 3 et (d) le niveau « mauvais » est bien plus présent que le niveau « bon » dans l'ensemble. Si l'amélioration de la compétence obtenue à l'essai 3 semble être due aux feedbacks pédagogiques fournis par le système GEFEEED, il est nécessaire de confirmer cette tendance en augmentant le nombre d'essais. En outre, l'absence de résultats homogènes pour chaque niveau et essai du groupe 3 reste à expliquer, tout comme le fait que le niveau « mauvais » du groupe 3 reste bien plus grand que celui du niveau « bon ». Une première hypothèse serait la surcharge d'informations visuelles du groupe 3. Une seconde hypothèse pourrait être liée au fait que durant la réalisation de cette compétence, le tube à essai dans lequel le liquide est versé, doit être incliné et la pipette tenue à la verticale. Le bout de la pipette doit toucher le bord du tube à essai lors de l'injection sans toucher la suspension contenue dans le tube. L'apprenant peut être amené à focaliser son attention sur cette exigence plutôt que de maintenir la pipette à la verticale.

6.3.4 Respect des séquences d'actions identifiées par le système MEVEL

Dans cette section, nous analysons les données issues du système MEVEL sur le respect des séquences d'actions réalisées par les apprenants du groupe 2 et 3, le groupe 1 ne disposant pas des fonctionnalités de décomposition de la tâche en étape avec des CP. L'objectif ici est d'évaluer l'apprenant sur le respect des guides virtuels proposés par le système MEVEL. L'ensemble des participants ont réussi à réaliser la totalité des étapes. Cependant, nous avons constaté que certains participants ont manqué des ICP lors de la réalisation de la tâche aux étapes 3 et 7. Le tableau 6.14 présente le nombre de participants ayant manqué des ICP sur les essais 1 à 3, étant donné que, à l'essai 4 aucun participant n'utilise les fonctionnalités du système MEVEL permettant d'identifier les CP manqués.

À l'essai 1, sur l'ensemble des étapes 3 et 7, 6 participants du groupe 2 et 7 participants du groupe 3 ont manqué des ICP. Aux essais 2 et 3, 5 participants du groupe 2 et 6 participants du groupe 3 ont manqué des ICP à chacun de ces essais. On ne constate pas

	Essai 1				Essai 2				Essai 3			
	G2		G3		G2		G3		G2		G3	
étapes	3	7	3	7	3	7	3	7	3	7	3	7
participants	5	7	7	7	5	6	6	6	7	4	5	7
moyennes (\bar{x})	6		7		5		6		5		6	

TABLE 6.14 – Nombre de participants ayant manqué des ICP aux étapes 3 et 7

de différences notables sur les deux groupes ni en termes de progression tout au long des essais. Néanmoins, le fait qu'un tiers des participants dans chaque groupe ait manqué les ICP, pose question. Une explication possible peut résider dans la complexité de la tâche considérée qui possède actuellement que deux étapes contenant un seul ICP chacun. Ainsi ce concept ne semble pas avoir été assimilé de par sa fréquence.

6.3.5 Questionnaires : rétention des séquences d'actions, auto-évaluation et évaluation par la méthode des juges

Dans cette partie, nous présentons, en premier lieu, les réponses aux questions permettant d'étudier la rétention des informations sur les séquences d'actions effectuées par l'apprenant. Ensuite nous analysons les réponses au questionnaire d'auto-évaluation des apprenants, puis comparons ces réponses aux évaluations réalisées par les experts. Les deux premiers questionnaires ont été remplis par les apprenants juste après la réalisation de la tâche à l'essai 4, c'est-à-dire sans aucune aide pour tous les groupes. Pour rappel, les participants ont travaillé avec des aides et guides liés à leurs groupes durant les essais 1 à 3.

6.3.5.1 Questionnaire sur le respect des séquences d'actions

L'objectif de ce questionnaire est d'évaluer la rétention d'informations des apprenants sur l'ordre d'exécution des actions de la tâche considérée. Ce questionnaire (*cf.* annexe I) est composé de deux parties, le prélèvement avec 3 questions (*cf.* tableau 6.15) et l'injection avec 4 questions (*cf.* tableau 6.16).

Les réponses aux questions sont présentées dans les tableaux 6.15 et 6.16. Dans ce questionnaire, il s'agit pour les participants de classer correctement les étapes à réaliser pour une dilution en indiquant le bon numéro d'ordre de l'étape dans le questionnaire. Les réponses aux questions (prélèvement et injection) attribuent à chaque question un

Réponses correctes	Questions	1	2	3
2	Flamber après prélèvement			
1	Flamber avant prélèvement			
3	Homogénéiser (vortex) avant prélèvement			

TABLE 6.15 – Questions sur le prélèvement

Réponses correctes	Questions	1	2	3	4
2	Ne pas toucher le diluant avec la pipette lors de l'injection				
3	Homogénéiser (Vortex) après injection				
4	Flamber après injection				
1	Flamber avant injection				

TABLE 6.16 – Questions sur l'injection

numéro d'ordre allant de 1 à 3 pour le prélèvement et de 1 à 4 pour l'injection. Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux 6.17 (a) et (b). Ces tableaux présentent le nombre des participants ayant donné de mauvaises réponses aux questions. L'ensemble des participants du groupe 1 ont correctement répondu à toutes les questions (prélèvement et injection).

(a) Prélèvement

Questions	1	2	3
G1	0	0	0
G2	0	1	1
G3	1	2	2

(b) Injection

Questions	1	2	3	4
G1	0	0	0	0
G2	2	0	0	2
G3	3	2	2	2

TABLE 6.17 – Résultats du questionnaire sur le respect des étapes (nombres de mauvaises réponses)

On constate que dans le groupe 2, 1 participant a donné de mauvaises réponses aux questions 2 et 3 du prélèvement (ce qui correspond à une erreur, car il y a une inversion dans l'ordre des actions au total). Deux autres participants ont donné de mauvaises réponses aux questions 1 et 4 de l'injection (2 inversions au total, donc 2 erreurs). En ce qui concerne le groupe 3, 1 participant a donné des mauvaises réponses aux questions 1, 2 et 3 du prélèvement (2 erreurs) et aux questions 1 et 3 de l'injection (1 erreur). Un autre participant a donné de mauvaises réponses aux questions 2 et 3 du prélèvement (1 erreur).

Sur l'injection uniquement, 1 participant a donné de mauvaises réponses aux quatre questions (3 erreurs). Un autre participant a donné de mauvaises réponses aux questions 1, 2 et 4 (2 erreurs). Il est étonnant de constater que les participants du groupe 1 qui ne reçoivent aucune aide ou guide n'ont pas commis d'erreurs, tandis que ceux du groupe 2 ont commis moins d'erreurs que ceux du groupe 3. Pourtant la décomposition visuelle des étapes et des actions n'était disponible que pour le groupe 2 et 3. La différence des résultats peut s'expliquer par l'augmentation de la charge cognitive du groupe 1 au groupe 3. Pour rappel, le groupe 2 utilise les aides du système MEVEL uniquement, tandis que le groupe 3 utilise en plus les aides du système GEFEED. En termes de nombre d'inversion, il y a 0 erreur pour le groupe 1, 3 erreurs pour le groupe 2 et 9 erreurs sur le groupe 3. Le nombre d'erreurs est relativement faible dans l'ensemble, mais il serait de nouveau nécessaire d'augmenter le nombre d'essais afin de voir si les tendances observées se confirment. En outre, les erreurs réalisées par les participants du groupe 3 peuvent s'expliquer par une dépendance aux aides données, les participants étant probablement focalisé sur les indications fournies par ces feedbacks visuels liés aux compétences gestuelles

6.3.5.2 Auto-évaluation : compétences gestuelles et procédurales

Le questionnaire de cette partie a pour objectif de comparer l'auto-évaluation des apprenants à l'évaluation de deux experts en vue d'évaluer l'impact des aides et guides fournis après qu'on les ait retirés. Le questionnaire de cette partie est constitué de deux sous-parties portant sur les compétences gestuelles et procédurales. Le questionnaire est rempli par les participants après le quatrième essai. Les deux sous-parties du questionnaire sont composées de 7 questions chacune basée sur une échelle de Likert de 1 à 5.

La première partie (*cf.* tableau 6.18) suit une graduation non linéaire codée comme suit : 1 (je n'ai jamais pensé à le faire), 2 (je l'ai fait de temps en temps), 3 (Ne sais pas / ne se prononce pas), 4 (je l'ai fait régulièrement, peut-être il y a t-il eu quelques oublis) et 5 (je l'ai fait systématiquement). La seconde partie (*cf.* tableau 6.19) suit une graduation linéaire allant de 1 (très mal fait) à 5 (très bien fait).

Compétences procédurales Cette partie présente les résultats des questions du tableau 6.18. Les réponses sont présentées dans la figure 6.14, on peut y voir pour chacune des questions le nombre de participants ayant donné des réponses comprises entre 1 (je n'ai jamais pensé à le faire) et 5 (je l'ai fait systématiquement).

Si on unifie les niveaux réponses 4 et 5, le groupe 1 (suivi par le groupe 2) est celui

	1. Je n'ai jamais pensé à le faire	2. Je l'ai fait de temps en temps	3. Ne sais pas / ne se prononce pas	4. Je l'ai fait régulièrement (peut-être il y a t-il eu quelques oublis)	5. Je l'ai fait systématiquement
1. Homogénéiser (vortex) avant prélèvement					
2. Flamber avant prélèvement					
3. Flamber après prélèvement					
4. Flamber avant injection					
5. Ne pas toucher le diluant avec la pipette lors de l'injection					
6. Flamber après injection					
7. Homogénéiser (vortex) après injection					

TABLE 6.18 – Questionnaire d'auto-évaluation des compétences procédurales

	1. Très mal fait	2	3	4	5. Très bien fait
1. Tube à la verticale lors du prélèvement					
2. Pipette à la verticale lors du prélèvement					
3. Pipette horizontale (après le prélèvement au début injection)					
4. Tube penché lors de l'injection					
5. Pipette à la verticale lors de l'injection					
6. Ne pas trembler durant la dilution					
7. Rester à une bonne distance de la zone de stérilité					

TABLE 6.19 – Questionnaire d'auto-évaluation des compétences gestuelles

ayant l'impression d'avoir le plus homogénéisé la solution, flambé le col du tube avant et après prélèvement ainsi qu'avant l'injection (questions 1, 2, 3 et 4). 5 participants n'ont jamais fait attention à ne pas toucher le diluant avec la pipette lors de l'injection dans

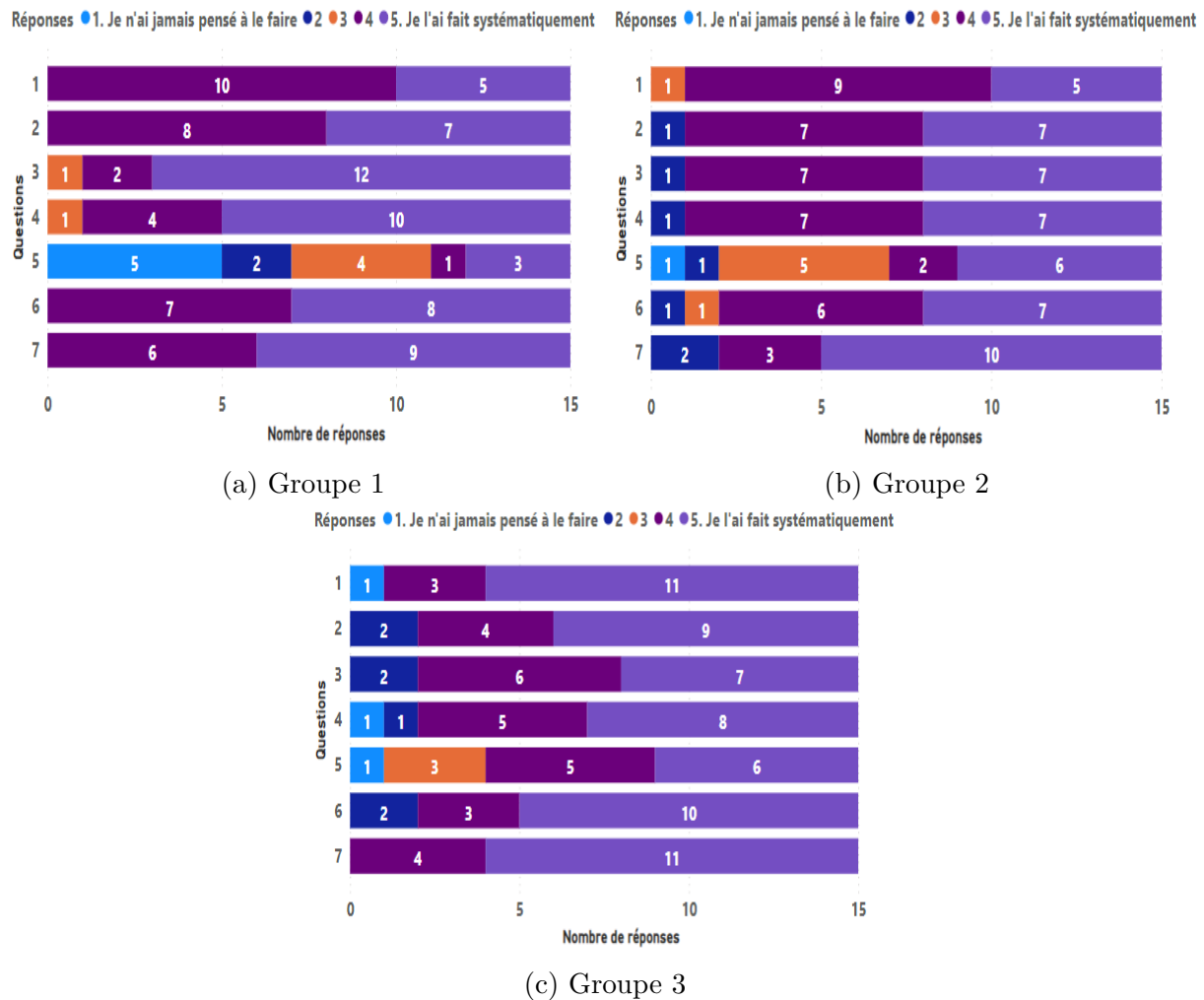


FIGURE 6.14 – Résultats du questionnaire d'auto-évaluation des compétences procédurales

le groupe 1 contre 1 personne dans les groupes 2 et 3 (question 5). En ce qui concerne les questions 6 (flamber après injection) et 7 (homogénéiser après injection), le groupe 1 obtient de meilleurs résultats suivis par le groupe 3, puis le groupe 2. Ces résultats suggèrent que les participants du groupe 1 pensent s'être mieux concentrés sur la réalisation du protocole comparativement aux autres groupes. Ce qui peut s'expliquer par l'absence d'informations relatives aux compétences gestuelles les déviant de l'objectif d'apprentissage de ce protocole. Il est par contre étonnant que le groupe 2, ayant visuellement le protocole formalisé à l'aide des CPs, donnent de moins bons résultats. Ceci doit être tempéré par le faible nombre de participants n'ayant pas pensé à faire telle ou telle action. Globalement, les différences sont marginales entre les trois groupes excepté pour la ques-

tion 5 (ne pas toucher le diluant avec la pipette) dont les meilleurs résultats sont obtenus par le groupe 3.

Compétences gestuelles Cette partie présente les résultats des questions du tableau 6.19. Les réponses sont présentées dans la figure 6.15, de même que les compétences procédurales, on peut y voir pour chacune des questions le nombre de participants ayant donné des réponses comprises entre 1 (très mal fait) et 5 (très bien fait).

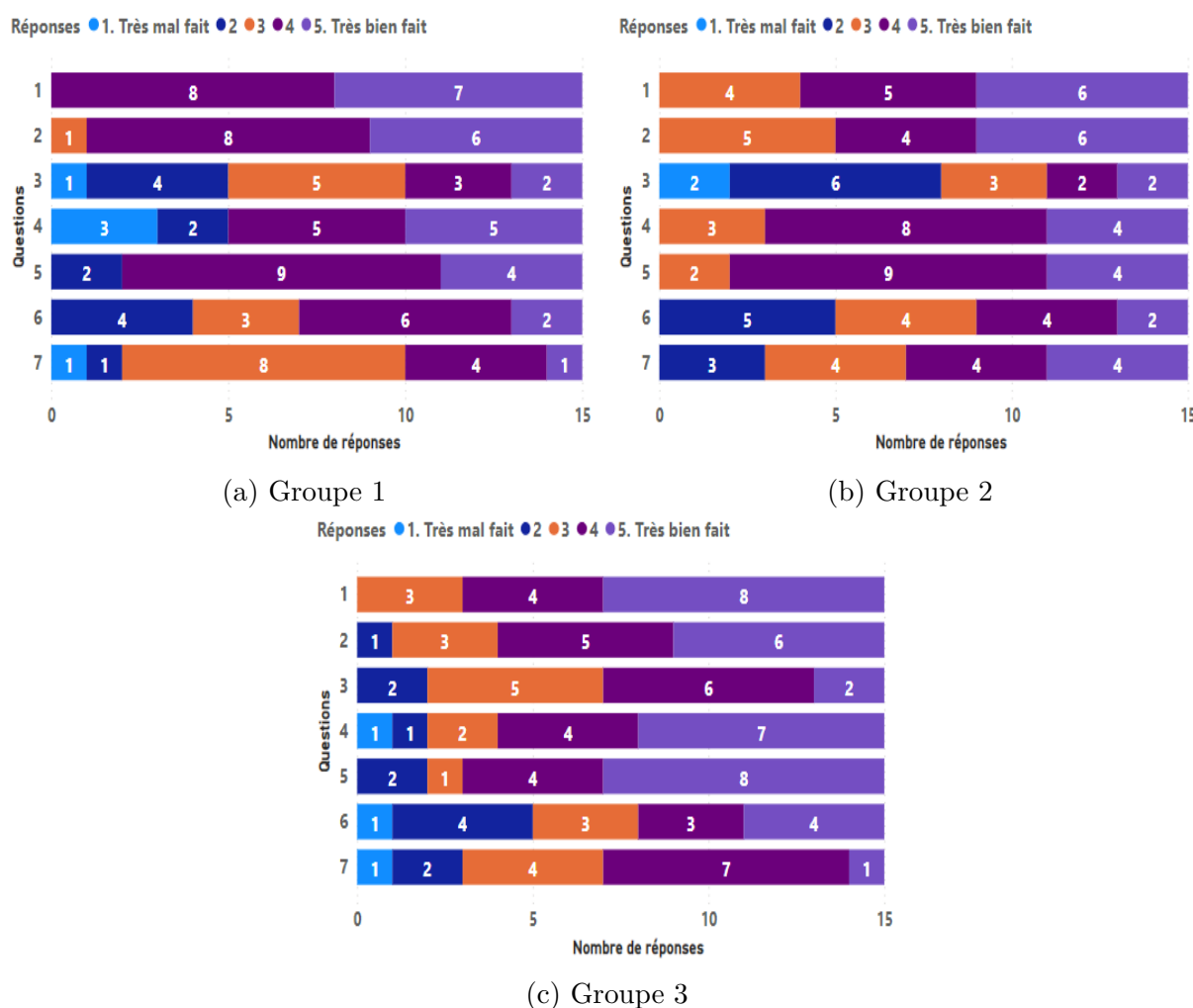


FIGURE 6.15 – Résultats du questionnaire d'auto-évaluation des compétences gestuelles

Si on regroupe les réponses de niveau 4 et 5, le groupe 1, devant le groupe 3, est celui ayant l'impression d'avoir le mieux tenu le tube et la pipette à la verticale lors du prélèvement (question 1 et 2). De plus, les participants du groupe 3 ont une bien meilleure

impression d'avoir tenu la pipette à l'horizontale, de la fin du prélèvement au début de l'injection (question 3). Environ 10 participants pensent avoir correctement incliné le tube à essai, tandis que 12 participants pensent avoir tenu la pipette à la verticale, lors de l'injection sur tous les groupes. En ce qui concerne la question 6 (tremblement), le groupe 1 obtient les meilleurs résultats (8 participants dont la note est supérieure ou égale à 4), suivi par le groupe 3 (7) et le groupe 2 (6). Quant à la question 7, 8 participants provenant des groupes 2 et 3 pensent être restés à une bonne distance de la zone de stérilité alors que ce nombre est réduit à 5 pour le groupe 1. En résumé, on observe que les participants du groupe 1 pensent avoir de meilleurs résultats aux questions 1), 2), 5) et 6) avec le groupe 2. Pour ce dernier groupe, on a de meilleurs résultats pour les questions 4) et 7) avec le groupe 3. Enfin, le groupe 3 l'emporte sur la question 3). Les groupes 1 et 2 ont des réponses très hétérogènes sur les questions 3), 6) et 7). Le groupe 3 obtient des meilleurs résultats sur cet aspect pour les questions 3) et 7). Le groupe 3 semble ainsi compenser l'hétérogénéité des résultats en direction des bonnes évaluations bien que dans l'ensemble ces évaluations soient moins bonnes que celles du groupe 1.

6.3.5.3 Évaluation des compétences gestuelles et procédurales par la méthode des juges

L'objectif de cette partie est d'évaluer les compétences procédurales et gestuelles des apprenants au quatrième essai, car après avoir reçu des aides sur les essais 1 à 3, les participants n'ont reçu aucune aide à l'essai 4. Deux experts ont noté individuellement les réalisations des apprenants en se basant sur des vidéos montrant les apprenants réalisant leurs tâches durant le quatrième essai. Ainsi, les résultats de cette évaluation serviront de base pour confronter les résultats de l'auto-évaluation des apprenants. Le questionnaire utilisé est composé de deux parties.

La première partie (tableau 6.20) est composée de 7 questions portant sur la réalisation des actions (réalisée/non réalisée). De même, la deuxième partie est composée de 7 questions portant sur les niveaux de réalisation des compétences gestuelles basées sur une échelle de Likert de 1 (très mal fait) à 5 (très bien fait). Nous utilisons le Kappa de Cohen pour mesurer la concordance inter-juges entre les deux évaluations. Le Kappa de Cohen (COHEN, 1960) est utilisé pour « *mesurer la force de l'accord entre deux évaluateurs ou deux méthodes de classification. Contrairement à une mesure classique de concordance par ratio (pourcentage), le Kappa de Cohen permet de comparer les résultats obtenus aux concordances qu'il serait possible d'observer si celles-ci étaient dues à des*

	1. Réalisée	2. Non réalisée
1. Homogénéiser (vortex) avant prélèvement		
2. Flamber avant prélèvement		
3. Flamber après prélèvement		
4. Flamber avant injection		
5. Ne pas toucher le diluant avec la pipette lors de l'injection		
6. Flamber après injection		
7. Homogénéiser (vortex) après injection		

TABLE 6.20 – Questionnaire d'évaluation des compétences procédurales

jugements hasardeux »⁴. Le tableau 6.22 présente les interprétations des scores obtenus.

	1. Très mal fait	2	3	4	5. Très bien fait
1. Tube à la verticale lors du prélèvement					
2. Pipette à la verticale lors du prélèvement					
3. Pipette horizontale (après le prélèvement au début de l'injection)					
4. Tube penché lors de l'injection					
5. Pipette à la verticale lors de l'injection					
6. Ne pas trembler durant la dilution					
7. Rester à une bonne distance de la zone de stérilité					

TABLE 6.21 – Questionnaire d'évaluation des compétences gestuelles

Les résultats des scores de Kappa de Cohen (K) obtenus sont présentés dans le tableau 6.23. Ces résultats représentent une moyenne de 0.612 et un écart-type de 0.152 sur l'ensemble des questions ce qui correspond à un « accord fort » entre les évaluateurs. Cependant, il y a des « accords modérés » aux questions 2, 3, 4 et 6 des compétences procédurales, et 4, 5 pour les compétences gestuelles. En outre, un « accord faible » a été obtenu à la question 7 de ce même questionnaire. Ce désaccord peut être dû au fait qu'avec des vidéos de l'environnement virtuel sur un écran 2D, il est difficile d'évaluer la

4. <https://cieri.fr/la-fidelite-inter-evaluation/>

K	Force de l'accord
< 0	Désaccord
0.0 – 0.20	Accord très faible
0.21 - 0.40	Accord faible
0.41 – 0.60	Accord modéré
0.61 – 0.80	Accord fort
0.81 – 1.00	Accord presque parfait

TABLE 6.22 – Interprétation de la force de l'accord (LANDIS *et al.*, 1977)

question 7 qui indique que l'apprenant doit : “Rester à une bonne distance de la zone de stérilité”.

Questions	1	2	3	4	5	6	7
Scores K sur les compétences procédurales	0.67	0.53	0.45	0.49	0.8	0.41	0.78
Scores K sur les compétences gestuelles	0.68	0.65	0.85	0.53	0.59	0.76	0.34

TABLE 6.23 – Scores de Cohen des questionnaires sur les compétences procédurales et gestuelles

Les moyennes des réponses aux questionnaires des deux experts sont présentées dans les figures 6.16 et 6.17. En cas de désaccord sur les réponses binaires, la réponse de l'expert avec le plus d'expérience est conservée.

Compétences procédurales On constate qu'au niveau des compétences procédurales (figure 6.16), le groupe 1 obtient de meilleurs résultats aux questions 1), 2), 4), 6) et 7), le groupe 2 à la question 3) (de peu) et le groupe 3 à la question 5). Les groupes 1 et 2 obtiennent les mêmes résultats aux questions 4) et 7). Pour rappel, les résultats de l'auto-évaluation réalisés dans la section ci-dessus indiquent que le groupe 1 pense avoir les meilleurs résultats sur l'ensemble des questions, excepté à la question 5 où le groupe 3 obtient de meilleurs résultats. Globalement, il semble avoir une concordance entre l'évaluation des juges et l'auto-évaluation en ce sens.

Compétences gestuelles Pour ce qui est des compétences gestuelles (figure 6.17), si on considère les réponses de niveau 4 et 5, le groupe 3 obtient de meilleurs résultats aux questions 1), 2), 3), 5) et 7), le groupe 2 à la question 4) et le groupe 1 à la question 6). Pour rappel, dans l'auto-évaluation des participants sur les compétences gestuelles, les

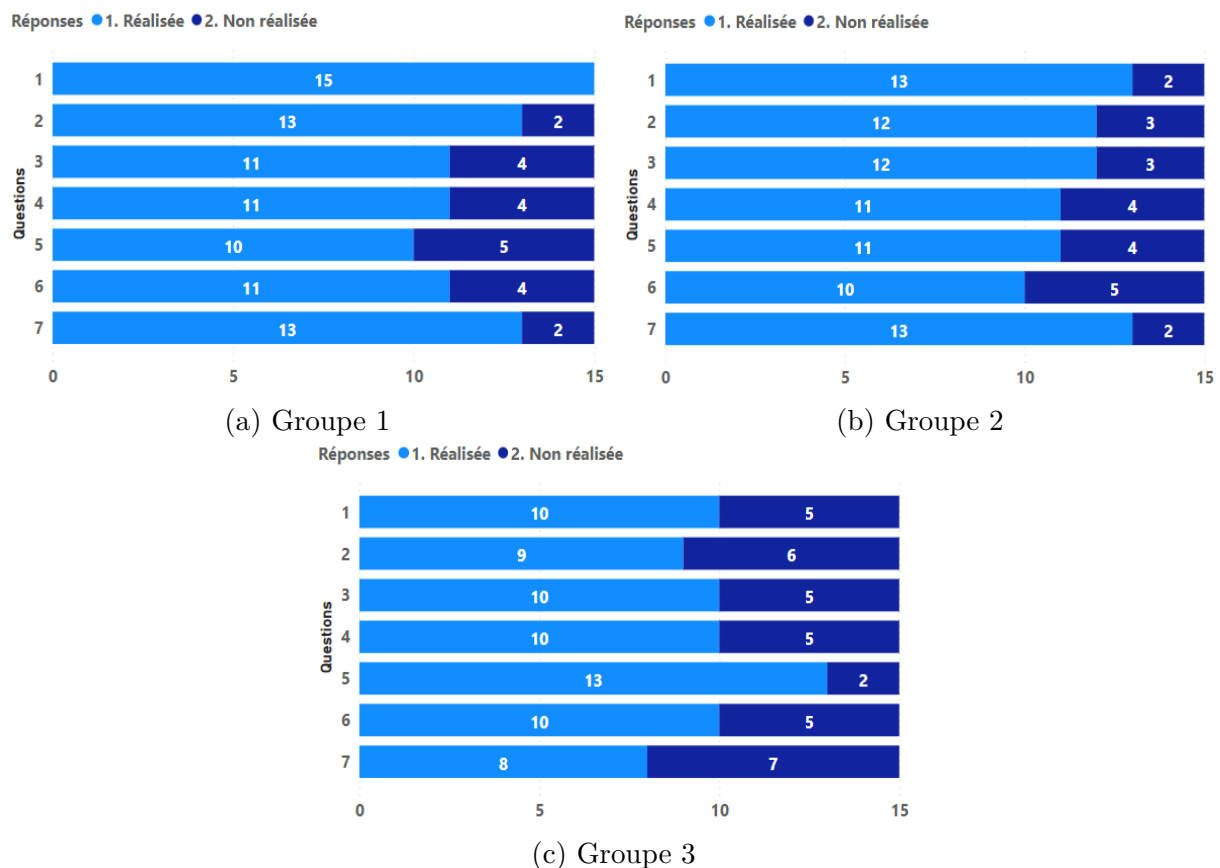


FIGURE 6.16 – Moyennes des réponses du questionnaire d'évaluation des compétences procédurales des deux experts

résultats indiquent que les participants du groupe 1 pensent avoir de meilleurs résultats aux questions 1), 2), 3), 4) et 6), tandis qu'il s'agit de la question 7) pour ceux du groupe 3. Le groupe 3 l'emporte globalement sur les deux autres groupes.

Interprétations Les résultats obtenus par la méthode des juges sur les compétences procédurales et gestuelles comparées à ceux de l'auto-évaluation des apprenants indiquent que les apprenants ont le sentiment de savoir s'auto-évaluer sur les aspects procéduraux. Cependant, les évaluations des groupes par les juges ne concordent pas avec celles des apprenants pour les compétences gestuelles, ce qui souligne ici une difficulté dans la perception de ce qu'est un geste acceptable, par les apprenants, même si ces compétences ont été formalisées. Cette différence peut être due au fait qu'étant novice, l'auto-évaluation des gestes réalisés est une tâche difficile pour les apprenants. Cependant, la méthode des juges indique que le groupe 3 bénéficiant des systèmes MEVEL et GEFEED a de meilleures

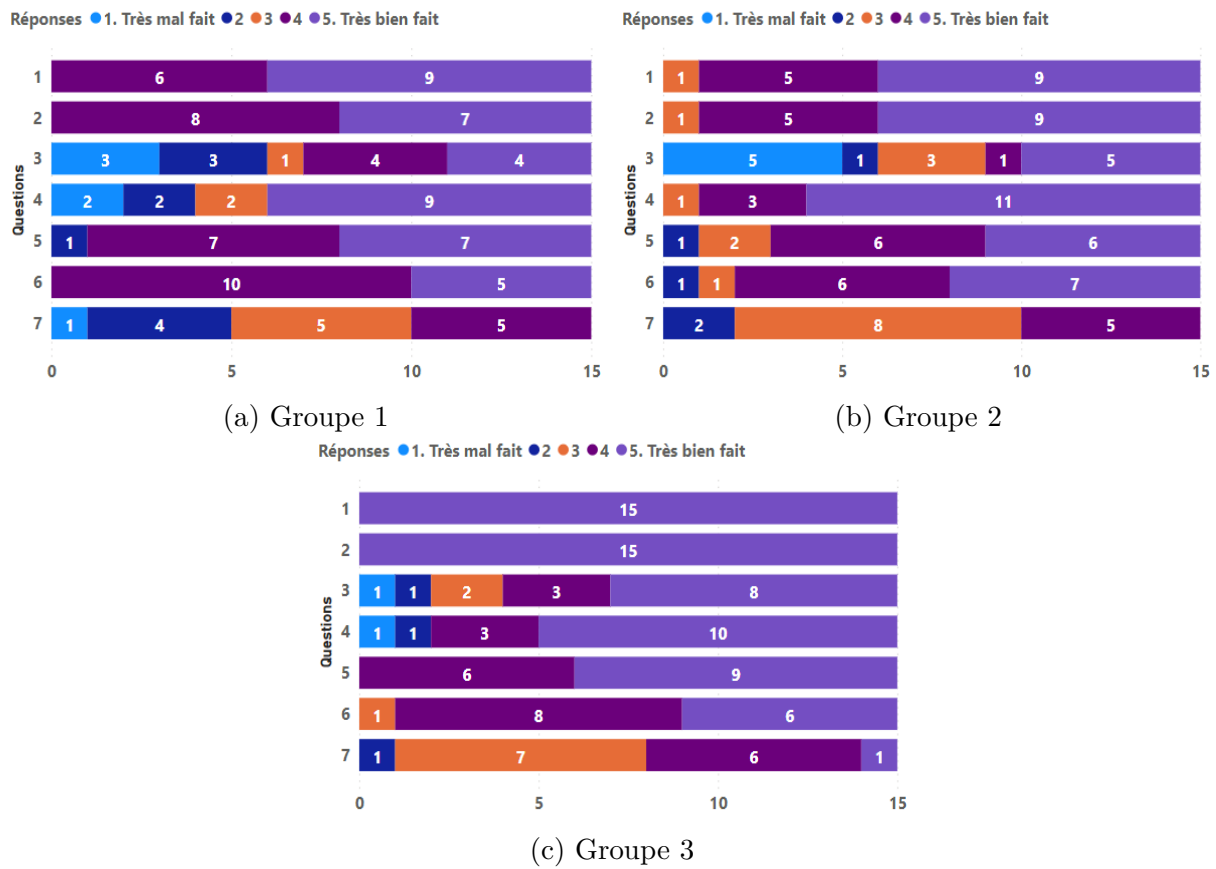


FIGURE 6.17 – Moyennes des réponses du questionnaire d'évaluation des compétences gestuelles des deux experts

évaluations sur ces compétences. Néanmoins, vu le faible nombre d'essais réalisés avec ou sans les aides et guides reçus, il est difficile de généraliser les résultats obtenus.

6.3.6 Utilisabilité

Dans cette partie, nous présentons les résultats évaluant l'utilisabilité conjointe de l'EV enrichi par les aides et guides créés à l'aide des systèmes proposés (MEVEL et GEFEED). L'utilisabilité du système GEFEED a été analysée à travers le modèle F-SUS présenté à la section 5.3.2.2 du chapitre 5 (*cf.* annexe F). Pour rappel, le modèle F-SUS (GRONIER *et al.*, 2021) est la version française du modèle SUS (BROOKE, 1996), il permet de mesurer de manière subjective l'utilisabilité perçue d'un système, tout en garantissant une prise en main rapide et sans engagement pour les utilisateurs interrogés (GRONIER *et al.*, 2021). Le tableau 6.24 présente les questions du modèle F-SUS avec une échelle de Likert codée

allant de 1 à 5 (de « pas du tout d'accord » à « tout à fait d'accord »). Les scores de chaque participant, classé par groupe, sont donnés dans le tableau 6.25.

	1. Pas du tout d'ac- cord	2	3	4	5. Tout à fait d'accord
1. Je voudrais utiliser ce système fréquemment					
2. Ce système est inutilement complexe					
3. Ce système est facile à utiliser					
4. J'aurais besoin du soutien d'un technicien pour être capable d'utiliser ce système					
5. Les différentes fonctionnalités de ce système sont bien intégrées					
6. Il y a trop d'incohérences dans ce système					
7. La plupart des gens apprendront à utiliser ce système très rapidement					
8. Ce système est très lourd à utiliser					
9. Je me suis senti · e très en confiance en utilisant ce système					
10. J'ai eu besoin d'apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir utiliser ce système					

TABLE 6.24 – Questions du modèle F-SUS (GRONIER *et al.*, 2021)

Participants	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Scores G1	95	85	97,5	90	80	85	90	100	85	80	80	92,5	60	77,5	75
Scores G2	42,5	77,5	87,5	92,5	72,5	70	75	92,5	80	90	85	80	62,5	70	75
Scores G3	80	92,5	85	90	72,5	57,5	80	67,5	70	82,5	97,5	87,5	75	50	82,5

TABLE 6.25 – Scores F-SUS obtenus pour les 45 participants

Le score le plus bas est de 42,5/100 (groupe 2) et le plus haut de 100/100 (groupe 1). Les scores moyens ainsi que les écarts-types des différents groupes sont présentés dans le tableau (*cf.* tableau 6.26). Les EVAH enrichis (avec les systèmes MEVEL et GEFEED) ou non, ont obtenu des moyennes supérieures à 76,5/100 indiquant un classement dans la catégorie « Acceptable » (*cf.* figure 6.18). Seulement 2 participants (1 du groupe 2 et 1 du groupe 3) n'ont pas dépassé un score F-SUS de 50/100. Les EVAH proposés ont été perçus comme acceptable par la très grande majorité des participants. En outre, la moyenne F-SUS du groupe 3 (78/100) est légèrement supérieure à celle du groupe 2 (76,83) avec un écart-type équivalent. On note néanmoins que le score F-SUS du groupe 1 est

bien supérieur à celui des groupes 2 et 3. Cela peut s'expliquer par une prise en main plus longue des EVAH enrichis, due à l'intégration par les apprenants de fonctionnalités supplémentaires.

Participants	Moyenne (\bar{x})	Écarts-types (σ)
Scores G1	84,83	9,81
Scores G2	76,83	12,57
Scores G3	78	12,49

TABLE 6.26 – Moyennes et écarts-types du score F-SUS obtenus pour les 3 groupes

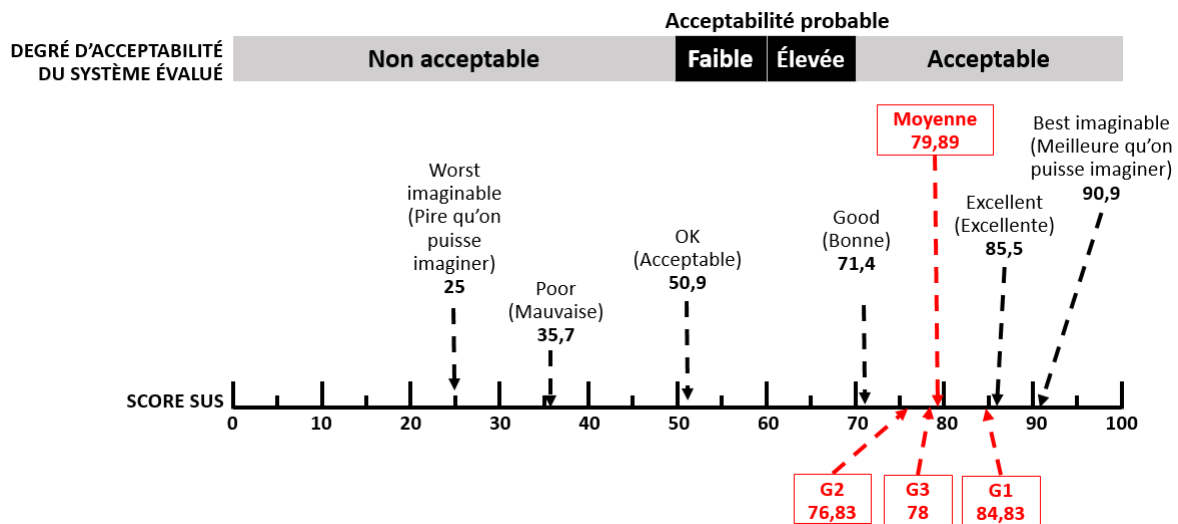


FIGURE 6.18 – Moyennes de score F-SUS (en rouge) obtenu

6.4 Discussion

L'objectif de cette expérimentation est d'étudier l'utilisabilité de l'EV enrichi par les guides et les aides des systèmes proposés (*i.e.* MEVEL et GEFEED) et leurs impacts sur la situation d'apprentissage dans un cadre spécifique, c'est-à-dire, une situation d'apprentissage de dilution d'une suspension de microbiologie. Nous espérons que cet impact soit positif en diminuant le temps de réalisation et en améliorant l'acquisition des compétences gestuelles ainsi que la rétention d'informations liées aux séquences d'actions à effectuer et leurs ordres. Nous tentons de vérifier les hypothèses suivantes :

- fournir des aides relatives à la décomposition spatiale et temporelle de la tâche à apprendre, via le système MEVEL a un impact positif sur l'apprentissage en termes

de temps de réalisation de la tâche et de rétention des étapes et actions à suivre ainsi que leur séquencement (*Hypothèse 3*) ;

- fournir des feedbacks pédagogiques adaptés aux gestes, en EV, via le système GEFEED, améliore l'acquisition de compétences gestuelles (*Hypothèse 4*).

Les résultats de cette expérimentation sont limités dans le cadre défini par l'unique situation d'apprentissage et son environnement virtuel enrichi (ou non) des aides et des guides proposés. Au sujet du temps utilisé pour réaliser la tâche, nous avons observé une baisse importante et significative pour la plupart des essais, quel que soit le groupe considéré. Cette baisse peut correspondre à une amélioration dans la prise en main de l'EV, dans la réalisation des gestes et l'exécution du protocole par l'apprenant. Bien que le groupe 1 a des temps inférieurs par rapport au groupe 2 et 3, les temps deviennent très proches à l'essai 4 pour tous les groupes. Cela montre un temps de prise en main nécessaire des fonctionnalités apportées par MEVEL et GEFEED avant d'aboutir à une performance équivalente en termes de temps d'exécution. La réduction du temps n'est cependant pas forcément synonyme d'amélioration de la qualité des gestes produits. En ce qui concerne les compétences gestuelles évaluées par le système, nous avons constaté que les aides et guides fournis au groupe 3 semblent apporter une amélioration. En effet, des résultats significatifs ont été obtenus en intergroupe, systématiquement à l'essai 3 pour le niveau « bon » des trois compétences. De plus, par rapport au groupe 2, le niveau « bon » n'était parfois pas atteint par au moins 50% des participants selon les essais. Les aides apportées par le système GEFEED impacteraient significativement et positivement l'acquisition des compétences gestuelles définies dans ce cadre expérimental ce qui confirme partiellement l'*Hypothèse 4*. En effet, ce résultat doit être tempéré par l'observation d'une grande hétérogénéité des résultats dans chaque niveau pour le groupe 3 et par le fait que le niveau « mauvais » l'emporte dans la plupart des cas. La progression intragroupe du groupe 3 n'est pas significative mais aucune dégradation des résultats n'a été observée au fur et à mesure des essais. Il semble en conséquence que les aides considérées ne soient pas suffisantes d'une part et adaptées à tous les participants d'autre part. De plus, rappelons que nous n'avons exploité qu'une seule modalité (visuelle) de feedbacks dans le cadre de cette expérimentation. L'augmentation du nombre d'essais semble nécessaire afin de confirmer les résultats obtenus voire dégager de nouvelles tendances. On note néanmoins que le ratio évaluant les compétences gestuelles peut-être sujet à discussion. En effet, un participant travaillant rapidement, par exemple, est susceptible d'avoir un ratio plus élevé. Si l'étape dure 3 secondes, la durée de maintien du tube à

essai à l'horizontale est plus courte pour avoir un bon ratio qu'un autre participant prenant son temps et réalisant l'étape en 8 secondes par exemple. De plus les intervalles d'angles choisis pour la définition des niveaux « bon », « moyen » et « mauvais » peuvent être questionnés. Enfin, aucune analyse comparative n'a été faite avec le groupe 1 qui ne bénéficie pas d'aides ou de guides, dû à l'absence de moyens techniques appropriés pour récolter les données de ce groupe en un temps raisonnable. Cette absence d'analyse ne permet pas d'établir l'influence de l'EVAH initial pour l'acquisition de compétences gestuelles par rapport au groupe 1. Sur le respect des séquences, l'ensemble des participants ont réussi à réaliser la totalité des étapes. Cependant, dans les étapes contenant des ICP (étapes 3 et 7), environ un tiers des participants des groupes 2 et 3 ont manqué des ICP. Il est étonnant de constater un tel résultat, plus spécifiquement pour le groupe 2, avec comme seul guide, les CPs décomposant visuellement les étapes en actions. Une explication résiderait dans le faible nombre d'étapes contenant des ICP dans cette tâche, ne donnant pas l'occasion aux participants d'intégrer ce concept correctement. Dans le questionnaire évaluant la rétention d'informations des apprenants sur l'ordre d'exécution du protocole, le groupe 1 a correctement répondu à l'ensemble des questions. Dans les groupes 2 et 3, 2 à 3 participants ont donné de mauvaises réponses aux questions ce qui est minime. La répétition de la tâche 4 fois semble ici suffisante pour retenir le protocole, les guides de MEVEL n'apportant pas de plus-values sur ce point. Si on ajoute le fait qu'aucune amélioration du temps spécifiquement liée au système MEVEL et GEFEED, n'a été constatée, l'*Hypothèse 3* est infirmée. En termes d'auto-évaluation des apprenants, pour ce qui est des compétences procédurales, les participants du groupe 1, suivi par le groupe 3, pensent globalement avoir des meilleurs résultats sur l'ensemble des questions. En ce qui concerne les compétences gestuelles, chacun des groupes pense avoir obtenu les meilleurs résultats à des questions bien spécifiques, ainsi aucune tendance générale ne se dégage dans ce contexte entre le groupe 2 et 3. L'évaluation réalisée par les experts, avec un « Accord fort » selon la méthode des juges, obtient des résultats similaires comparés à ceux de l'auto-évaluation pour les compétences procédurales, mais diffère de ceux de l'auto-évaluation des compétences gestuelles des apprenants, le groupe 3 obtenant de meilleurs résultats. Cela renforce l'*Hypothèse 4* mais souligne toute la difficulté de s'auto-évaluer correctement sur les compétences gestuelles. C'est pourtant est un élément déterminant pour les apprenants afin qu'ils passent le temps nécessaire pour atteindre le niveau requis. Ces résultats montrent la nécessité de disposer de système automatique de soutien à l'auto-évaluation et l'évaluation des apprenants lors de la réalisation de situa-

tions d'apprentissage adaptées aux gestes. Enfin, dans l'étude de l'utilisabilité des EVAH enrichis par les systèmes proposés, les groupes 1 à 3 ont obtenu des scores F-SUS (notés sur 100) de respectivement 84,83, 76,83 et 78. Ces résultats indiquent que l'EV enrichi par les guides et les aides fournis par MEVEL et GEFEED a été perçu comme acceptable selon la majorité des participants.

6.5 Conclusion

Dans ce chapitre, en utilisant les systèmes MEVEL et GEFEED présentés respectivement aux chapitres 4 et 5, nous avons réalisé une expérimentation dont l'objectif est d'évaluer l'utilisabilité et l'impact d'un EVAH enrichi par des aides (feedbacks pédagogiques adaptés aux gestes) et des guides virtuels du système MEVEL (*CheckPoints* et trajectoires). L'EVAH considéré permet d'apprendre à réaliser une opération de dilution d'une suspension en microbiologie. Dans ce contexte, nous avons formulé les hypothèses suivantes :

- fournir des aides relatives à la décomposition spatiale et temporelle de la tâche à apprendre, via le système MEVEL a un impact positif sur l'apprentissage en termes de temps de réalisation de la tâche et de rétention des étapes et actions à suivre ainsi que leur séquencement (*Hypothèse 3*) ;
- fournir des feedbacks pédagogiques adaptés aux gestes, en EV, via le système GEFEED, améliore l'acquisition de compétences gestuelles (*Hypothèse 4*).

L'expérimentation a montré plusieurs résultats intéressants. En termes de temps, aucun apport significatif par les aides et guides n'a été constaté bien que les temps convergent entre les groupes au bout de 4 essais. Les feedbacks fournis par le système GEFEED, semblent améliorer l'acquisition de compétences gestuelles au bout de trois répétitions de la tâche, bien que les résultats soient hétérogènes au sein de chaque groupe et que le niveau « mauvais » reste généralement prédominant. Ainsi, l'*Hypothèse 4*, est partiellement confirmée dans les limites de l'expérimentation réalisée. La très grande majorité des participants ont été en mesure de retenir l'ensemble des étapes et des actions à effectuer ainsi que l'ordre d'exécution, avec des résultats légèrement meilleurs pour le groupe dépourvu d'aides et de guides. Cette observation infirme l'*Hypothèse 3* si on ajoute les résultats relatifs au temps.

Une évaluation des compétences procédurales et gestuelles mêlant des questionnaires d'auto-évaluation des apprenants et une évaluation via la méthode des juges par des

experts ont montré que les conclusions des experts diffèrent de l'auto-évaluation des apprenants sur les compétences gestuelles. Dans ce contexte, le groupe ayant les aides et les guides a été mis en avant, et en conséquence l'apport du système GEFEED. Cela renforce l'*Hypothèse 4* mais souligne toute la difficulté des apprenants dans le fait d'évaluer l'acquisition de compétences gestuelles. On constate ainsi que les aides ou guides reçus sont insuffisants pour permettre une auto-évaluation de ces compétences. Les résultats de l'auto-évaluation et de la méthode des juges sont dans l'ensemble conforme pour les compétences procédurales. Aucune différence notable sur les trois groupes n'a été constaté ce qui contribue à infirmer l'*Hypothèse 3*. En outre, l'étude de l'utilisabilité indique que l'EV enrichi par les guides et aides fournies par MEVEL et GEFEED a été perçu comme acceptable et présente un intérêt selon la très grande majorité des participants.

En résumé, les résultats de cette expérimentation réalisée à partir des besoins d'observations des enseignants et considérant le point de vue des apprenants, semblent montrer la pertinence des feedbacks pédagogiques fournis grâce à GEFEED, pour l'acquisition des compétences gestuelles dans le cadre de la réalisation d'une dilution en microbiologie via l'EV spécifiquement développé. La métrique proposée permettant d'évaluer cette acquisition, c'est-à-dire le système de ratio, constitue une proposition pertinente et cohérente si on considère les résultats intergroupes obtenus et ceux de l'évaluation avec la méthode des juges. Ces résultats encourageants constituent une première évaluation du point de vue de l'apprenant de l'enrichissement en termes de guides et de feedbacks pédagogiques proposés par les systèmes dans le contexte d'un EVAH dédié à l'apprentissage de la dilution en microbiologie. Il convient cependant d'indiquer que, outre le cadre applicatif restreint de cette expérimentation, il faut noter que :

1. plus d'essais semble de toute évidence nécessaire pour
 - (a) confirmer les résultats et obtenir des indicateurs sur la progression de chaque participant
 - (b) et tendre vers une homogénéité des résultats pour chaque participant
2. des modalités de feedbacks, autre que visuels, doivent être considérées afin de tendre vers cette homogénéité notamment
3. le système de ratio évaluant les compétences gestuelles doit être amélioré car il demeure critiquable si l'exécution de la tâche se fait en un temps court
4. la capacité de l'EV, dépourvu des aides et guides, à améliorer les compétences procédurales et gestuelles doit être initialement analysé avant d'être enrichi

5. Enfin, en ce qui concerne l'absence d'impacts notables des guides basées sur les CPs pour l'acquisition de compétences procédurales, d'autres tâches simples et complexes en termes de séquences d'actions seront considérées à l'avenir. Un débriefing systématique des participants via la réalisation d'interviews aura lieu nous permettant d'éclaircir ce phénomène.

Nous présenterons dans le chapitre suivant une synthèse des travaux menés durant cette thèse, des contributions apportées sur le plan technique et scientifique, leurs limites ainsi que des perspectives d'améliorations.

QUATRIÈME PARTIE

Conclusion

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Notre objectif dans ces travaux de recherche a été de fournir des modèles, méthodes et outils permettant aux enseignants de mettre en place des situations dédiées à l'acquisition et à l'amélioration de gestes dans les Environnements Virtuels pour l'Apprentissage Humain (EVAH). Les contributions proposées ont été réalisées afin de prendre en compte les besoins d'observations des enseignants tout en réduisant les coûts de réingénierie. En effet, la plupart des EVAH existants ne permettent pas d'être réutilisés dans diverses situations sans un lourd processus de réingénierie. De plus, les feedbacks fournis aux apprenants ne peuvent évoluer en fonction de ces besoins d'observations dans la plupart des cas.

7.1 Synthèse des travaux

Dans ces travaux, nous avons proposé une méthode, un modèle descriptif, des architectures ainsi que des IHM opérationnalisés au sein de deux systèmes. Le premier système nommé MEVEL, permet aux enseignants de réutiliser des EVAH existants dans diverses situations d'apprentissage de gestes afin d'assister les apprenants. MEVEL offre aux enseignants la possibilité d'importer leurs Environnements Virtuels (EV), de démontrer, enregistrer et rejouer une tâche basée geste, de la décomposer une succession d'étapes, elles-mêmes décomposées grâce à un ensemble de CP visualisables via des formes géométriques 3D simples. Cette méthode permet à MEVEL de segmenter de façon automatique les mouvements d'intérêts, c'est-à-dire les mouvements que l'enseignant souhaite faire apprendre et évaluer. Les étapes ainsi que les CP créés permettent à MEVEL d'extraire des informations sur les séquences, leurs ordres, ainsi que les mouvements réalisés par l'apprenant. À partir de ces informations, MEVEL offre de plus quelques métriques pouvant aider à l'évaluation de la tâche (temps, vitesse, DTW) en comparant les performances de l'apprenant à ceux de l'enseignant. Le deuxième système proposé, nommé GEFEED,

permet aux enseignants de créer et éditer des feedbacks pédagogiques relatifs aux gestes réalisés par les apprenants dans l'EVAH. Grâce à GEFEED, l'enseignant peut choisir différentes modalités (*i.e.* visuel : couleur, texte ; haptique : vibration, audio : son ou voix) de feedbacks ainsi que leurs propriétés. De plus, à travers des déclencheurs (*i.e.* temporel, spatial, contact et métrique), l'enseignant peut choisir à quel moment et sous quelles conditions, le feedback sera fourni. Pour ce faire, il doit choisir l'une des étapes de la tâche, les objets virtuels impliqués, les métriques liées aux gestes ainsi que leurs valeurs d'acceptabilité. Nous avons réalisé trois expérimentations afin d'évaluer les systèmes proposés en termes d'utilisabilité, d'utilité et afin de tester l'impact des EV fonctionnellement enrichis sur l'apprentissage. La première expérimentation, réalisée du point de vue de l'enseignant concernait des tâches de lancers de fléchettes, de tirs au billard, et d'écriture d'une lettre. Les participants ont testé puis évalué l'utilisabilité et l'utilité de MEVEL. Cette expérimentation nous a permis de confirmer partiellement, c'est-à-dire, dans le contexte des conditions de cette expérimentation, l'hypothèse suivante :

- la démonstration du geste à apprendre par l'enseignant et sa décomposition spatiale et temporelle en séquences, via le système MEVEL, permet d'atteindre les objectifs des enseignants en termes de construction d'une situation évaluable (*Hypothèse 1*).

L'objectif de la deuxième expérimentation était d'évaluer un modèle descriptif de feedbacks pédagogiques proposé ainsi que l'utilisabilité et l'utilité du système GEFEED appliquée afin de générer des feedbacks pour une tâche de dilution d'une suspension en microbiologie. Avec des objectifs pédagogiques identiques, les enseignants ont varié leurs choix dans la conception et l'implémentation des feedbacks et de leurs déclencheurs. En termes d'objectifs pédagogiques, ils ont trouvé que les feedbacks proposés peuvent être utiles dans plusieurs situations d'apprentissage dédiées aux gestes. En ce qui concerne l'utilisabilité, le système GEFEED avec un score moyen F-SUS de 60,75/100 a été classé dans la catégorie « Ok » avec une probabilité faible. Cette expérimentation a été réalisée dans le contexte de la deuxième hypothèse ci-dessous :

- l'opérationnalisation d'un modèle descriptif de feedbacks pédagogiques à 4 dimensions « artefact virtuel d'intérêts, métrique d'évaluation, déclencheur, feedback multimodal » *via* le système GEFEED permet aux enseignants d'atteindre leurs objectifs en termes de retour pédagogique en EV (*Hypothèse 2*).

L'*Hypothèse 2* est en partie confirmée, car ces résultats ne sont valables que dans le contexte défini par l'expérimentation portant sur une unique situation d'apprentissage. Les

deux systèmes proposés ont été utilisés dans une troisième expérimentation afin d'évaluer l'impact des guides et aides proposées sur l'apprentissage. Les participants répartis sur trois groupes (G1 sans aide; G2 avec les CP et les trajectoires; G3 avec les CP, les trajectoires et les feedbacks pédagogiques) jouent le rôle de l'apprenant dans la même situation d'apprentissage que la précédente expérimentation, c'est-à-dire la dilution d'une suspension en microbiologie. Les participants ont réalisé trois essais de dilution avec les aides liées à leurs groupes, puis un quatrième essai sans aucune aide.

Les résultats montrent que les meilleurs temps obtenus pour réaliser la tâche sont ceux du groupe 1, mais ces temps convergent au fil des essais entre les groupes. En termes de compétences procédurales, l'analyse des données du système et l'évaluation des juges ont globalement montré que les apports de MEVEL pour la décomposition de la tâche à l'aide de CP n'apportent aucun bénéfice, mais ne dégrade pas les résultats. L'*Hypothèse 3* ci-dessous est donc infirmée dans le contexte de cette étude :

- fournir des aides relatives à la décomposition spatiale et temporelle de la tâche à apprendre, via le système MEVEL a un impact positif sur l'apprentissage en termes de temps de réalisation de la tâche et de rétention des étapes et actions à suivre ainsi que leur séquencement (*Hypothèse 3*).

En ce qui concerne l'acquisition des compétences gestuelles, nous avons formulé l'*Hypothèse 4* suivante :

- fournir des feedbacks pédagogiques adaptés aux gestes, en EV, via le système GEFEED, améliore l'acquisition de compétences gestuelles (*Hypothèse 4*).

Dans le cadre défini par la troisième expérimentation, le groupe 3 obtient des performances significativement meilleures que le groupe 2 pour les compétences gestuelles. Néanmoins, il y a une grande disparité des résultats au sein de chaque groupe. De plus, l'acquisition des compétences gestuelles se révèle globalement insuffisante en moyenne pour chaque groupe sur les 4 essais. Cependant, l'évaluation des juges des compétences gestuelles était supérieure en moyenne pour le groupe 3 par rapport à celle du groupe 2. Enfin l'auto-évaluation des compétences gestuelles a relevé toute la difficulté des apprenants dans le fait de percevoir son propre niveau d'acquisition. Ajouté au fait que cette expérimentation n'a été réalisée qu'avec un seul EV pour une seule tâche à apprendre, nous ne pouvons que confirmer partiellement l'hypothèse 4. Enfin, l'EVAH enrichit ou non par les systèmes MEVEL et GEFEED a obtenu un score moyen F-SUS de 79,89/100. Cette moyenne indique que l'EVAH est classé dans la catégorie « Bonne », c'est-à-dire

acceptable. Les travaux réalisés présentent un ensemble de limites et des perspectives que nous détaillons dans la section suivante.

7.2 Limites et perspectives

Les travaux de cette thèse, bien qu’ayant permis d’atteindre plusieurs objectifs de recherche, présentent certaines limites sur plusieurs aspects qui concernent notamment la mise en place du processus d’évaluation, les valeurs d’acceptabilité à définir par les enseignants et l’analyse des traces issues de l’activité d’apprentissage. Dans la suite de cette section, nous présentons ces limites ainsi que des pistes d’amélioration.

7.2.1 Améliorations fonctionnelles et IHM

La première perspective concerne l’amélioration, à court terme, des IHM des deux systèmes proposés (MEVEL et GEFEED). Pour l’instant, MEVEL est utilisé au sein de l’EVAH, c’est-à-dire que la mise en place de la situation d’apprentissage se fait en utilisant un casque de RV, ce qui peut être problématique pour certains utilisateurs sensibles à la cybercinétose ou certaines situations comme par exemple la réalisation de gestes de précision (*ex.* écriture d’une lettre, geste de chirurgie dentaire). Une solution serait de proposer une interface 2D permettant aux enseignants de décomposer la tâche en étapes à l’aide des CheckPoints (CP). L’enseignant serait en mesure de manipuler et modifier les propriétés (forme, position et orientation) des CP créés. Pour rappel, lors de la réalisation de l’expérimentation au chapitre 4, les participants n’ont pas été en mesure de configurer la tâche d’écriture, notamment à cause de difficultés pour redimensionner, positionner et orienter avec précision des CP de très petites tailles. Il faudrait dans ce contexte, proposer une nouvelle interaction ou améliorer celle existante pour prendre en compte ce type de CP via une interface 2D offrant différents angles d’observation et niveaux de zoom. Par ailleurs, dans ce premier prototype du système GEFEED, les feedbacks créés peuvent être liés à un ou plusieurs déclencheurs, qui ne sont pas réutilisables avec d’autres feedbacks. Une évolution à pouvoir créer les feedbacks et les déclencheurs de façon indépendante puis les lier en fonction des besoins des utilisateurs. Pour l’instant, dans le système GEFEED, le choix de certaines propriétés (parties du corps, couleurs, etc.) des feedbacks et des déclencheurs se fait *via* une saisie textuelle. Plusieurs participants de la deuxième expérimentation (évaluation du système GEFEED) ont suggéré de réaliser ces

modifications à travers une liste présentant l'ensemble des choix possibles.

7.2.2 Analyse et exploitation des traces

Les traces liées aux systèmes proposés (MEVEL et GEFEED) ne sont pour l'instant pas exploitées après leurs utilisations dans l'EVAH. Ces traces peuvent pourtant aider les enseignants pour une évaluation empirique des apprenants. Le système MEVEL génère des traces liées aux séquences d'actions et aux mouvements des apprenants ainsi qu'aux temps utilisés pour réaliser chacune des étapes de la tâche à apprendre. Le système GEFEED génère pour sa part des traces liées aux déclenchements et à la durée d'apparition des différents feedbacks créés. Une analyse de ces traces permettrait aux enseignants d'avoir un suivi afin de réaliser des statistiques générales sur l'évolution de l'ensemble des apprenants, mais aussi des statistiques détaillées propres à chaque apprenant en utilisant notamment les *Learning Analytics (LA)*. Le projet HUBBLE¹ peut être utilisé dans ce contexte. En effet, il « *permet la collecte de traces, le calcul d'indicateurs, la description du processus d'analyse et la mise à disposition d'indicateurs sous forme de tableaux de bord d'apprentissage* » (GILLIOT *et al.*, 2018). Il faudrait, pour y parvenir, proposer un modèle permettant d'extraire des informations sur l'acquisition des compétences des apprenants à partir d'une description des besoins des enseignants. Ces statistiques, qui faciliteraient l'étude de l'impact des systèmes proposés sur l'apprentissage soulèvent des questions d'ordre méthodologiques et techniques à savoir :

- Comment proposer un modèle permettant aux enseignants de décrire les compétences à observer en situation d'apprentissage de gestes ?
- Quelle IHM mettre en place pour permettre une description et une visualisation intuitive des compétences par les enseignants ?
- Comment opérationnaliser ces modèles et son IHM en intégrant des EVAH existants ?

7.2.3 Extraction des valeurs d'acceptabilités des métriques

Dans le chapitre 3 de ce manuscrit nous avons identifié 6 catégories de métriques non exclusives (cinématiques, géométriques, dynamiques, quantités et occurrences, scores et temporelles) utilisées pour l'évaluation des apprenants en situation d'apprentissages de

1. <http://hubblelearn.imag.fr>

gestes dans les EVAH. Lors de la mise en place de ces situations, l'enseignant choisit l'ensemble des métriques qui sont utilisées pour guider et évaluer les apprenants à l'aide du système GEFEED. Les gestes des apprenants peuvent en général être classés dans plusieurs catégories, par exemple, acceptable ou non acceptable, mais davantage de nuances sont possibles. Il est ainsi nécessaire de définir des seuils ou des intervalles d'acceptabilité pour chaque métrique choisie, afin d'identifier les catégories auxquelles appartiennent les gestes réalisés par les apprenants. La difficulté de cette tâche réside dans le fait que les métriques n'ont pas toujours les mêmes interprétations et sont dépendantes du contexte. Une approche consiste à utiliser les moyennes ou les médianes des valeurs obtenues (plus ou moins l'écart type) à l'issue de plusieurs démonstrations réalisées de la même tâche par l'enseignant pour déterminer ces seuils. Mais il n'est pas toujours souhaitable d'utiliser la moyenne surtout si les données ne suivent pas la loi normale. Dans ce contexte d'autres solutions sont possibles, par exemple, dans un système de formation virtuelle pour la thérapie physique, WEI *et al.* (2015) ont utilisé la théorie de la décision bayésienne pour définir un seuil pour une métrique nommée « la précision des utilisateurs ». Cependant, cette méthode n'est pas entièrement automatisée. En effet, les experts doivent construire une base de données, constituée des mouvements des utilisateurs avec leur score de performance calculé à partir de l'évaluation de l'expert et du score DTW. Dans d'autres situations, plusieurs intervalles d'acceptabilité peuvent exister pour une même métrique (ex. on peut considérer les niveaux « moyen » et « bon » de la troisième expérimentation comme acceptables). Il est donc nécessaire de mettre en place des méthodes permettant d'extraire les valeurs d'acceptabilité des métriques en prenant en compte les interprétations de ces métriques et les catégories auxquelles elles appartiennent. Il est possible d'utiliser des techniques de *machine learning* pour l'extraction des valeurs d'acceptabilité. COULAND (2020) ont proposé un système fondé sur les propriétés cinématiques et géométriques du mouvement et permettant d'obtenir une séparation de ces derniers en différents groupes en intégrant les besoins d'observation de l'enseignant comme critères de séparation. L'inconvénient principal des techniques de *machine learning* porte sur le fait qu'elles nécessitent la plupart du temps d'un nombre de données important. Cependant, certaines de ces techniques, par exemple les forêts aléatoires (*Random Forest* (RF)), nécessitent peu de données et peuvent être utilisées dans ce contexte.

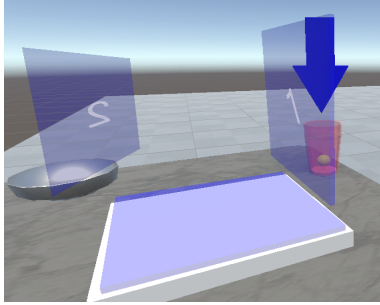
7.2.4 Améliorations et recommandations de feedbacks pédagogiques

Nous avons proposé un nombre limité de feedbacks dans ces travaux. Il serait intéressant d'augmenter le nombre de feedbacks proposés, en intégrant d'autres types de feedbacks pour l'apprentissage de gestes. Par ailleurs, il faut noter que les enseignants ne sont pas toujours familiarisés avec les stratégies utilisées pour fournir des feedbacks aux apprenants dans le cadre de l'apprentissage des gestes. Bien que le système GEFEED permette aux enseignants de créer leurs feedbacks pédagogiques, ces derniers doivent choisir ces feedbacks en fonction de leurs propres connaissances. Un système de recommandation de feedbacks basé sur les stratégies utilisées dans la littérature ainsi que les traces liées à l'utilisation des systèmes MEVEL et GEFEED permettrait d'assister les enseignants dans le choix et la définition des propriétés des feedbacks. L'analyse des travaux de SIGRIST *et al.* (2012) a permis d'identifier un ensemble de stratégies pour délivrer des feedbacks pédagogiques adaptés aux gestes. Il s'agit principalement, selon le niveau de l'apprenant, d'adapter la quantité de feedback fourni ainsi que le contenu des informations délivrées en prenant en compte la complexité de la tâche considérée. Dans ce contexte, sur la base de cette étude, à partir des caractéristiques (niveaux des apprenants, complexité des tâches considérées, quantités et fréquences des informations fournies) des stratégies identifiées, il nous faut proposer des outils pour assister les enseignants dans le choix des feedbacks pédagogiques délivrer dans les EVAH dédiés aux gestes.

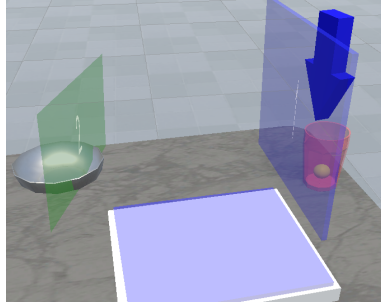
7.2.5 Génération automatique des configurations des CP pour la décomposition en séquence de la tâche

La mise en place du processus d'évaluation avec MEVEL peut s'avérer fastidieuse, surtout lorsqu'on a une tâche constituée de nombreuses séquences et actions à réaliser. Ainsi, une première perspective est d'aider les enseignants dans la configuration de ces situations d'apprentissage avec le système MEVEL. L'objectif est d'identifier et d'extraire de façon automatique, à partir des démonstrations des enseignants, la décomposition en séquence de chaque étape autrement dit que le système soit capable de générer automatiquement le nombre et la configuration de chaque CP. Dans le cadre d'un stage de Master 2 nous avons mené travaux préliminaires en utilisant une technique de *machine learning* (JOU DIEH, 2021). Une méthode permettant de prédire le nombre de points de contrôle intermédiaire (ICP) dans une séquence ainsi que leurs positions dans l'EVAH a

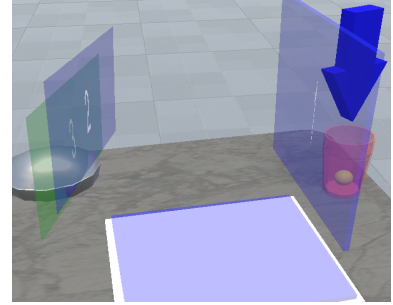
été conçue, implémentée et validée.



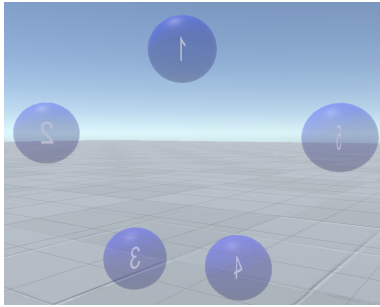
(a) Tâche de manipulation d'un verre, les ICP sont ceux placés manuellement



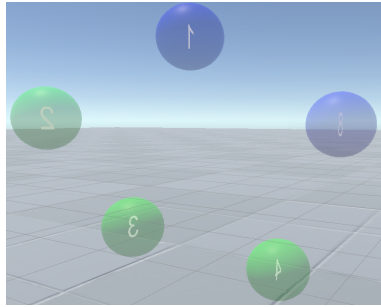
(b) Tâche de manipulation d'un verre, les ICP sont ceux prédits



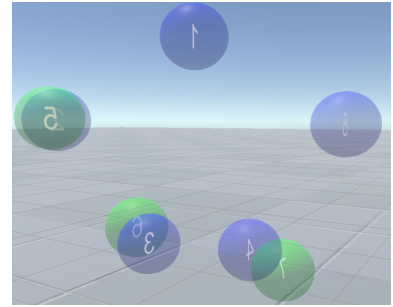
(c) Tâche de manipulation d'un verre, les ICP sont ceux placés manuellement & prédits



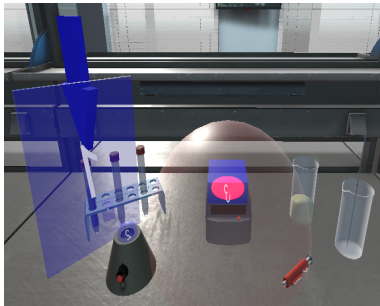
(d) Tâche de dessin de formes géométriques, les ICP sont ceux placés manuellement



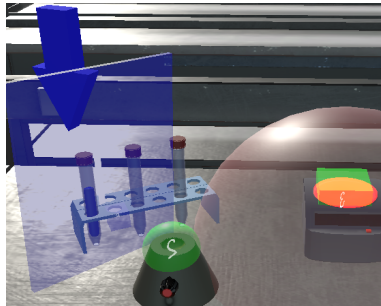
(e) Tâche de dessin de formes géométriques, les ICP sont ceux prédits



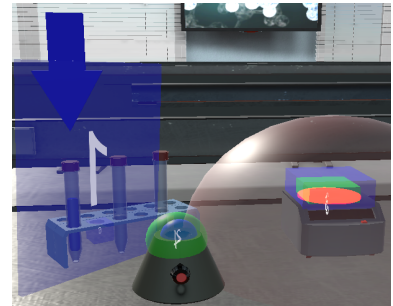
(f) Tâche de dessin de formes géométriques, les ICP sont ceux placés manuellement & prédits



(g) Tâche de dilution, les ICP sont ceux placés manuellement



(h) Tâche de dilution les ICP sont ceux prédits



(i) Tâche de dilution, les ICP sont ceux placés manuellement & prédits

FIGURE 7.1 – Quelques exemples de CP (en bleu) et de prédictions d'ICP (en vert)

Nous nous sommes intéressés uniquement aux ICP pour le moment, en partant du principe que les checkpoints de départ (SCP) et de fin (ECP) correspondent généralement

à des actions simples entraînant une collision en EV ou le déclenchement d'un événement facilement identifiable. Cette méthode utilise un pipeline composé : (i) d'un modèle de classification permettant de parcourir les données de mouvement à l'aide d'une fenêtre temporelle de taille préalablement fixée, afin de prédire si dans cette fenêtre une collision avec un ICP doit avoir lieu ou non et (ii), d'un modèle de régression permettant de prédire la position de l'ICP pour chaque fenêtre temporelle où une collision avec un ICP doit avoir lieu. Pour chaque modèle, un algorithme reposant sur les forêts aléatoires (*Random Forest* (RF)) a été entraîné pour la classification pour le point (i) et pour la régression en (ii). La méthode proposée a été évaluée via trois situations d'apprentissage faisant intervenir un nombre variable d'ICP, c'est-à-dire, de 1 jusqu'à 3. Les trois situations sont les suivantes : la manipulation d'un verre, le dessin de formes polygonales simples et la tâche de dilution d'une suspension en microbiologie. Les résultats obtenus indiquent une efficacité supérieure ou égale à 70% pour déterminer le nombre d'ICP à créer ; et une erreur moyenne quadratique normalisée (NRMSE) en dessous de 0,07 pour déterminer la position dans l'espace 3D de chaque ICP créé. Des exemples des tâches considérées avec des CP placés dans leurs EV ainsi que les prédictions des CP sont présentés à la figure 7.1. Cette méthode a fait l'objet d'une soumission d'article dans une conférence internationale (*i.e.* GRAPP 2023). À la suite de ce travail, plusieurs travaux sont à mener afin d'améliorer la méthode proposée. Parmi ces travaux, on peut noter : (a) la diminution du nombre de démonstrations nécessaires dans des configurations différentes (entre 50 et 180 en fonction du nombre d'ICP à trouver) (b), l'optimisation de la taille de la fenêtre temporelle qui peut fortement influencer les résultats (c), la prédiction de l'orientation et de la taille des ICP et (d), l'application à d'autres tâches.

7.2.6 Expérimentations supplémentaires

L'ensemble des expérimentations réalisées dans ces travaux ont permis de confirmer partiellement 3 hypothèses et d'en infirmer une. Par conséquent, il est nécessaire de poursuivre nos travaux à l'aide de nouvelles études expérimentales. Tout d'abord, il serait intéressant de réaliser des expérimentations à plus grande échelle, avec un nombre d'apprenants et d'enseignants plus importants en vue de confirmer ou d'infirmer les résultats obtenus dans ces travaux. Relativement à la troisième expérimentation, les résultats significatifs pour l'acquisition de compétences gestuelles en intergroupe l'ont été systématiquement au bout du troisième essai pour la tâche de dilution. Cependant, la disparité importante des résultats dans chaque groupe et la prédominance globale des mauvaises

performances nous amène à considérer un plus grand nombre d'essais afin de confirmer, affiner ou infirmer ces résultats. En outre, dans une situation d'apprentissage de dilution d'une suspension en microbiologie en condition réelle, les apprenants exécutent plusieurs dilutions successivement. Dans l'expérimentation que nous avons réalisée, les apprenants faisaient des pauses entre chaque dilution. Une expérimentation dans laquelle les apprenants réalisent des dilutions sans interruption permettrait d'avoir des résultats intéressants surtout dans le cadre d'une étude sur le transfert des compétences dans le monde réel. De plus, il serait aussi intéressant de faire varier les situations d'apprentissage en fonction des domaines afin de mesurer l'impact des systèmes proposés dans d'autres contextes spécifiques. Il est aussi important d'évaluer l'utilisation, en autonomie des systèmes proposés par les enseignants en vue d'obtenir des critiques ou des résultats plus précis et personnalisés. Enfin, dans les résultats présentés dans l'expérimentation mesurant l'impact des systèmes proposés sur l'apprentissage, nous n'avons pas pu comparer les données sur les compétences gestuelles des participants n'utilisant pas le système MEVEL. Il est cependant intéressant, voire nécessaire de trouver un moyen pour récolter leurs données afin de les comparer et ainsi d'évaluer les capacités de l'EV initial à favoriser l'acquisition de compétences gestuelles. En ce qui concerne les compétences procédurales, l'absence d'impact des guides basés sur le système de CP de MEVEL, nous interroge sur la pertinence de la méthode proposée et la réelle complexité de la tâche de dilution en termes de procédure. Des expérimentations sur d'autres tâches d'une plus grande complexité semblent ici nécessaires pour poursuivre nos travaux.

BIBLIOGRAPHIE

- ABE, Naoko (2016), « Notation Laban. Quatre exemples de marche », in : *Le génie de la marche*, Poétique, Savoirs et Politique des Corps Mobiles, p. 348-355.
- ABE, Naoko, Jean-Paul LAUMOND, Paolo SALARIS et Florent LEVILLAIN (2017), « On the use of dance notation systems to generate movements in humanoid robots : The utility of Laban notation in robotics », in : *Social Science Information* 56.2, p. 328-344, DOI : 10.1177/0539018417694773.
- ADOLF, Jindřich, Peter KÁN, Benjamin OUTRAM, Hannes KAUFMANN, Jaromír DOLEŽAL et Lenka LHOTSKÁ (2019), « Juggling in VR : Advantages of Immersive Virtual Reality in Juggling Learning », in : *25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, New York, NY, USA : Association for Computing Machinery.
- AKANMU, Abiola A., Johnson OLAYIWOLA, Omobolanle OGUNSEIJU et David MCFEETERS (2020), « Cyber-physical postural training system for construction workers », in : *Automation in Construction* 117, p. 103272.
- ALUR, Anupam, Pratik SHRIVASTAV et Aditya Vinay JUMDE (2014), « Haptic Technology :-A Comprehensive Review of its Applications and Future Prospects », in :
- ANDERSON, Fraser et Walter F. BISCHOF (2013), « Learning and Performance with Gesture Guides », in : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, Paris, France : Association for Computing Machinery, 1109–1118, ISBN : 9781450318990.
- ANNE-CATHERINE OUDART, Lucie Petit et (2017), « Apprendre et faire apprendre un geste professionnel », in : URL : <http://journals.openedition.org/ree/5995>.
- ARISTIDOU, Andreas, Efstathios STAVRAKIS, Panayiotis CHARALAMBOUS, Yiorgos CHRYSANTHOU et Stephania Loizidou HIMONA (août 2015), « Folk Dance Evaluation Using Laban Movement Analysis », in : *J. Comput. Cult. Herit.* 8.4, 20 :1-20 :19.
- BALDOMINOS, Alejandro, Yago SAEZ et Cristina García del POZO (2015), « An Approach to Physical Rehabilitation Using State-of-the-art Virtual Reality and Motion Tracking Technologies », in : *Procedia Computer Science* 64, p. 10 -16.

-
- BALLAN, Luca, Aparna TANEJA, Jürgen GALL, Luc VAN GOOL et Marc POLLEFEYS (2012), « Motion capture of hands in action using discriminative salient points », in : *European Conference on Computer Vision*, Springer, p. 640-653.
- BAUDOUIN, Cyrille, Michel BENEY, Pierre CHEVAILLER et Agnès LEPALLEC (2007), « Recueil de traces pour le suivi de l'activité d'apprenants en travaux pratiques dans un environnement de réalité virtuelle », in : *Revue STICEF* 14.
- BELLARBI, Abdelkader, Jean-Pierre JESSEL et Laurent DA DALTO (2019), « Towards Method Time Measurement Identification Using Virtual Reality and Gesture Recognition », in : *2019 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)*, p. 191-1913, DOI : 10.1109/AIVR46125.2019.00040.
- BEVLY, David M. (août 2004), « Global Positioning System (GPS) : A Low-Cost Velocity Sensor for Correcting Inertial Sensor Errors on Ground Vehicles », in : *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 126.2, p. 255-264, ISSN : 0022-0434, DOI : 10.1115/1.1766027.
- BLUMSTEIN, Gideon *et al.* (2020), « Randomized Trial of a Virtual Reality Tool to Teach Surgical Technique for Tibial Shaft Fracture Intramedullary Nailing », in : *Journal of Surgical Education* 77.4, p. 969-977, ISSN : 1931-7204, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2020.01.002>.
- BOGERT, Antonie van den, Thomas GEIJTENBEEK, Oshri EVEN ZOHAR, Frans STEENBRINK et Elizabeth HARDIN (juil. 2013), « A real-time system for biomechanical analysis of human movement and muscle function », in : *Medical & biological engineering & computing* 51, DOI : 10.1007/s11517-013-1076-z.
- BÖHME, Rainer et Felix C FREILING (2008), « On metrics and measurements », in : *Dependability metrics*, Springer, p. 14-20.
- BOLETSIS, Costas (2017), « The New Era of Virtual Reality Locomotion : A Systematic Literature Review of Techniques and a Proposed Typology », in : *Multimodal Technologies and Interaction* 1.4, ISSN : 2414-4088, DOI : 10.3390/mti1040024, URL : <https://www.mdpi.com/2414-4088/1/4/24>.
- BOSSARD, Cyril, Gilles KERMARREC, Cédric BUCHE et Jacques TISSEAU (2008), « Transfer of learning in virtual environments : a new challenge? », in : *Virtual Reality* 12.3, p. 151-161.
- BOWMAN, Douglas A. (1999), « Interaction Techniques for Common Tasks in Immersive Virtual Environments : Design, Evaluation, and Application », AAI9953819, thèse de doct., USA, ISBN : 0599569867.

-
- BRIÈRE, Fabienne (2020), « Les gestes didactiques de métier d’enseignants stagiaires en éducation physique et sportive : une (re) configuration en contexte », in : *Contextes et didactiques. Revue semestrielle en sciences de l’éducation* 16.
- BROOKE, John (1996), « Sus : a “quick and dirty” usability », in : *Usability evaluation in industry* 189.3.
- (2013), « SUS : a retrospective », in : *Journal of usability studies* 8.2, p. 29-40.
- BUCHE, Cédric, Ronan QUERREC, Pierre DE LOOR et Pierre CHEVAILLIER (2004), « Mascaret : Pedagogical multi-agents system for virtual environment for training. », in : *Journal of Distance Education Technologies* 2.4, p. 41-61, URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00610857>.
- BUESCHER, Julian Frederik *et al.* (2018), « Effect of Continuous Motion Parameter Feedback on Laparoscopic Simulation Training : A Prospective Randomized Controlled Trial on Skill Acquisition and Retention », in : *Journal of Surgical Education* 75.2, p. 516-526.
- BYSTROM, Karl-Erik, Woodrow BARFIELD et Claudia HENDRIX (avr. 1999), « A Conceptual Model of the Sense of Presence in Virtual Environments », in : *Presence : Teleoperators and Virtual Environments* 8.2, p. 241-244, DOI : 10.1162/105474699566107.
- CANNAVÒ, Alberto, Filippo Gabriele PRATTICÒ, Giuseppe MINISTERI et Fabrizio LAMBERTI (2018), « A Movement Analysis System Based on Immersive Virtual Reality and Wearable Technology for Sport Training », in : *Proceedings of the 4th International Conference on Virtual Reality, ICVR 2018, New York, NY, USA : Association for Computing Machinery*, 26–31.
- CANNON, W., Gregg NICANDRI, Karl REINIG, Howard MEVIS et Jocelyn WITTSTEIN (avr. 2014), « Evaluation of Skill Level Between Trainees and Community Orthopaedic Surgeons Using a Virtual Reality Arthroscopic Knee Simulator », in : *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 96, e57, DOI : 10.2106/JBJS.M.00779.
- CHAN, Jacky C.P., Howard LEUNG, Jeff K.T. TANG et Taku KOMURA (2011), « A Virtual Reality Dance Training System Using Motion Capture Technology », in : *IEEE Transactions on Learning Technologies* 4.2, p. 187-195, DOI : 10.1109/TLT.2010.27.
- CHANG, Justues, Daniel BANASZEK, Jason GAMBREL et David BARDANA (août 2015), « Global Rating Scales and Motion Analysis Are Valid Proficiency Metrics in Virtual and Benchtop Knee Arthroscopy Simulators », in : *Clinical orthopaedics and related research* 474, DOI : 10.1007/s11999-015-4510-8.

-
- CHEN, Jun, Yuan YUAN et Jianwen YANG (2015), « Research on virtual assembly technology based on haptic senses », in : *2015 10th International Conference on Computer Science Education (ICCSE)*, p. 725-728, DOI : 10.1109/ICCSE.2015.7250340.
- CHEN, Liang, Lingling WU, Xuwei LI et Jin XU (2019), « An Immersive VR Interactive Learning System for Tenon Structure Training », in : *2019 2nd International Conference on Data Intelligence and Security (ICDIS)*, p. 115-119, DOI : 10.1109/ICDIS.2019.00025.
- CHEVAILLIER, Pierre (2006), « Les systèmes multi-agents pour les environnements virtuels de formation », thèse de doct.
- CHIANG, Pei-Ying, Han-Yu CHANG et Yung-Ju CHANG (2018), « PotteryGo : A Virtual Pottery Making Training System », in : *IEEE Computer Graphics and Applications* 38.2, p. 74-88.
- CIRIO, Gabriel, Maud MARCHAL, Anne-Hélène OLIVIER et Julien PETTRE (avr. 2013), « Kinematic Evaluation of Virtual Walking Trajectories », in : *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 19, p. 671-80, DOI : 10.1109/TVCG.2013.34.
- COHEN, Jacob (1960), « A coefficient of agreement for nominal scales », in : *Educational and psychological measurement* 20.1, p. 37-46.
- CORMIER, Jérémy (mar. 2012), « Mobiliser une analyse de l'activité comme aide à la conception et à l'évaluation d'un Environnement Virtuel pour l'Apprentissage Humain : un exemple en implantologie dentaire », Theses, Université de Bretagne occidentale - Brest, URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00844758>.
- CORRÊA, Ana Grasielle Dionásio, Natália Regina KINTSCHNER et Silvana Maria BLASCOVI-ASSIS (2019), « System of Upper Limb Motor Rehabilitation Training Using Leap Motion and Gear VR in Sessions of Home Game Therapy », in : *2019 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, p. 1097-1102, DOI : 10.1109/ISCC47284.2019.8969586.
- COULAND, Quentin (2020), « Contribution à l'apprentissage humain de gestes à l'aide de techniques de clustering pour l'analyse de mouvements capturés », thèse de doct.
- CRUZ-NEIRA, Carolina, Daniel J. SANDIN et Thomas A. DEFANTI (1993), « Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality : The Design and Implementation of the CAVE », in : *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '93, Anaheim, CA : Association for Computing Machinery, 135-142, DOI : 10.1145/166117.166134.

-
- DA DALTO, Laurent, F BENUS et Olivier BALET (juil. 2010), « The use and benefits of Virtual Reality tools for the welding training », in :
- DE PONTI, Roberto, Jacopo MARAZZATO, Andrea M MARESCA, Francesca ROVERA, Giulio CARCANO et Marco M FERRARIO (2020), « Pre-graduation medical training including virtual reality during COVID-19 pandemic : a report on students' perception », in : *BMC medical education* 20.1, p. 1-7.
- DEL BIMBO, Alberto, Andrea FERRACANI, Daniele PEZZATINI et Lorenzo SEIDENARI (2017), « Case Studies : BLSD and Surgical Checklist », in : *Natural Interaction in Medical Training : Tools and Applications*, Cham : Springer International Publishing, p. 41-80, DOI : 10.1007/978-3-319-61036-8_4.
- DJADJA, Djadja Jean Delest, Ludovic HAMON et Sébastien GEORGE (sept. 2019), « Modeling and Evaluating of Human 3d+t Activities in Virtual Environment », in : *The 14th European Conference on Technology Enhanced Learning*, Delft, Netherlands : Springer, p. 696-700, DOI : 10.1007/978-3-030-29736-7_69, URL : <https://hal-univ-lemans.archives-ouvertes.fr/hal-02298496>.
- DJADJA, Djadja Jean Delest, Ludovic HAMON et SÉBASTIEN GEORGE (fév. 2020), « Design of a Motion-based Evaluation Process in Any Unity 3D Simulation for Human Learning », in : *Proceedings of the 15th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications, VISIGRAPP*, Valletta, Malta : SCITEPRESS, p. 137-148, DOI : 10.5220/0008989001370148.
- DRAPER, John V., David B. KABER et John M. USHER (1998), « Telepresence », in : *Human Factors* 40.3, p. 354-375, DOI : 10.1518/001872098779591386.
- EAVES, Daniel L., Gavin BRESLIN et Paul van SCHAIK (2011), « The Short-Term Effects of Real-Time Virtual Reality Feedback on Motor Learning in Dance », in : *Presence* 20.1, p. 62-77, DOI : 10.1162/pres_a_00035.
- EBERT, Dylan, Sanika GUPTA et Fillia MAKEDON (2016), « Ogma : A Virtual Reality Language Acquisition System », in : *Proceedings of the 9th ACM International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments*, PETRA '16, Corfu, Island, Greece : Association for Computing Machinery, DOI : 10.1145/2910674.2910681.
- ELLIS, Stephen R (1994), « What are virtual environments? », in : *IEEE Computer Graphics and Applications* 14.1, p. 17-22.
- EMMA-OGBANGWO, C., N. COPE, R. BEHRINGER et M. FABRI (2014), « Enhancing User Immersion and Virtual Presence in Interactive Multiuser Virtual Environments

-
- through the Development and Integration of a Gesture-Centric Natural User Interface Developed from Existing Virtual Reality Technologies », in : *HCI International*.
- FANG, Te-Yung, Pa-Chun WANG, Chih-Hsien LIU, Mu-Chun SU et Shih-Ching YEH (fév. 2014), « Evaluation of a Haptics-Based Virtual Reality Temporal Bone Simulator for Anatomy and Surgery Training », in : *Comput. Methods Prog. Biomed.* 113.2, 674–681, DOI : 10.1016/j.cmpb.2013.11.005.
- FAZELI, Hamid Reza, Sumanth Kuntavalli VENKATESH et Qingjin PENG (2018), « A Virtual Environment for Hand Motion Analysis », in : *Procedia CIRP* 78, 6th CIRP Global Web Conference – Envisaging the future manufacturing, design, technologies and systems in innovation era (CIRPe 2018), p. 127-132, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.09.060>.
- FERREIRA, Sanmari Costa, Rafael Oliveira CHAVES, Marcos César da Rocha SERUFFO, Antônio PEREIRA, Anderson Phelipe Dias Sabry AZAR, Ângela Vilhena DIAS, Alex de Assis Santos dos SANTOS et Marcus Vinicius Henriques BRITO (oct. 2020), « Empirical Evaluation of a 3D Virtual Simulator of Hysteroscopy Using Leap Motion for Gestural Interfacing », in : *J. Med. Syst.* 44.11, DOI : 10.1007/s10916-020-01662-y.
- FITZGERALD, Diarmaid, John FOODY, Dan KELLY, Tomas WARD, Charles MARKHAM, John McDONALD et Brian CAULFIELD (2007), « Development of a wearable motion capture suit and virtual reality biofeedback system for the instruction and analysis of sports rehabilitation exercises », in : *2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, p. 4870-4874.
- FLUET, Gerard, Jigna PATEL, Qinyin QIU, Matthew YAROSSE, Sergei ADAMOVICH, Alma MERIANS et Eugene TUNIK (2017), « Early versus delayed VR-based hand training in persons with acute stroke », in : *2017 International Conference on Virtual Rehabilitation (ICVR)*, p. 1-7, DOI : 10.1109/ICVR.2017.8007490.
- FUCHS, Philippe, Moreau GUILLAUME, Berthoz ALAIN et Vercher JEAN-LOUIS (2006), *Le traité de la réalité virtuelle*, vol. 1, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, chap. 1.
- FUKUMORI, Satoshi, Akio GOFUKU, Kenji ISATAKE et Kenji SATO (2014), « Mirror therapy system based virtual reality for chronic pain in home use », in : *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, p. 4034-4039, DOI : 10.1109/IECON.2014.7049106.
- FURTADO, Daniel, Adriano PEREIRA, Adriano ANDRADE et Douglas BELLOMO JR (fév. 2013), « A specialized motion capture system for real-time analysis of mandibular

-
- movements using infrared cameras », in : *Biomedical engineering online* 12, p. 17, DOI : 10.1186/1475-925X-12-17.
- FURTADO, Joshua S, Hugh HT LIU, Gilbert LAI, Herve LACHERAY et Jason DESOUZA-COELHO (2019), « Comparative analysis of optitrack motion capture systems », in : *Advances in Motion Sensing and Control for Robotic Applications*, Springer, p. 15-31.
- GALLEGOS-NIETO, Enrique, Hugo I MEDELLÍN-CASTILLO, Germánico GONZÁLEZ-BADILLO, Theodore LIM et James RITCHIE (2017), « The analysis and evaluation of the influence of haptic-enabled virtual assembly training on real assembly performance », in : *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 89.1, p. 581-598.
- GIBET, Sylvie et Alexis HÉLOIR (déc. 2007), « Formalisme de description des gestes de la langue des signes française pour la génération du mouvement de signeurs virtuels », in : *Revue TAL* 48.3, p. 115-149, URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00502857>.
- GILLIOT, Jean-Marie, Sébastien IKSAL, Daniel Magloire MEDOU et Inès DABBEBI (2018), « Conception participative de tableaux de bord d'apprentissage Participatory Design of Learning Analytics Dashboards », in :
- GRONIER, Guillaume et Alexandre BAUDET (2021), « Psychometric Evaluation of the F-SUS : Creation and Validation of the French Version of the System Usability Scale », in : *International Journal of Human-Computer Interaction* 37.16, p. 1571-1582, DOI : 10.1080/10447318.2021.1898828.
- GROSJEAN, Jérôme et Sabine COQUILLART (jan. 2001), « Command & Control Cube : a Shortcut Paradigm for Virtual Environments », in : *Proc. Eurographics Workshop on Virtual Environments*, DOI : 10.2312/EGVE/EGVE01/001-012.
- HACHET, Martin (2003), « Interaction avec des environnements virtuels affichés au moyen d'interfaces de visualisation collective », in :
- HAGHIGHI OSGOUEI, Reza, David SOULSBV et Fernando BELLO (2018), « An Objective Evaluation Method for Rehabilitation Exergames », in : *2018 IEEE Games, Entertainment, Media Conference (GEM)*, p. 28-34, DOI : 10.1109/GEM.2018.8516507.
- HALL, Craig R, Randy J STILES et Carol D HORWITZ (1998), « Virtual reality for training : Evaluating knowledge retention », in : *proceedings. IEEE 1998 virtual reality annual international symposium (Cat. No. 98CB36180)*, IEEE, p. 184-189.
- HALSEY, Lewis G, Douglas CURRAN-EVERETT, Sarah L VOWLER et Gordon B DRUMMOND (2015), « The fickle P value generates irreproducible results », in : *Nature methods* 12.3, p. 179-185.

-
- HAMENT, Blake, Alex CATER et Paul Y. OH (2017), « Coupling virtual reality and motion platforms for snowboard training », in : *2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, p. 556-560, DOI : 10.1109/URAI.2017.7992668.
- HANUSZ, Zofia, Joanna TARASINSKA et Wojciech ZIELINSKI (2016), « Shapiro–Wilk test with known mean », in : *REVSTAT-Statistical Journal* 14.1, p. 89-100.
- HATTIE, John et Helen TIMPERLEY (2007), « The power of feedback », in : *Review of educational research* 77.1, p. 81-112.
- HE, Tianyu, Xiaoming CHEN, Zhibo CHEN, Ye LI, Sen LIU, Junhui HOU et Ying HE (2017), « Immersive and collaborative Taichi motion learning in various VR environments », in : *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*, p. 307-308, DOI : 10.1109/VR.2017.7892299.
- HECKE, T Van (2012), « Power study of anova versus Kruskal-Wallis test », in : *Journal of Statistics and Management Systems* 15.2-3, p. 241-247.
- HIROAKI, Nishino, Murayama KOUTA, Shuto KAZUYA, Tsuneo KAGAWA et Utsumiya KOUCHI (2011), « A calligraphy training system based on skill acquisition through haptization », in : *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 2, 271–284.
- HO, Nicholas, Pooi-Mun WONG, Matthew CHUA et Chee-Kong CHUI (2018), « Virtual reality training for assembly of hybrid medical devices », in : *Multimedia Tools and Applications*, DOI : 10.1007/s11042-018-6216-x.
- HOSOKAWA, Yasushi, Daiki URATA, Toyoo TAKATA, Yoshihiko ABE *et al.* (2017), « The motion capturing of female divers under water and the trial production of motion viewers for developing a virtual diving experience learning system », in : *Artificial Life and Robotics* 22.3, p. 346-356.
- HUANG, Albert, Abraham BACHRACH, Peter HENRY, Michael KRAININ, Daniel MATURANA, Dieter FOX et Nicholas ROY (jan. 2011), « Visual Odometry and Mapping for Autonomous Flight Using an RGB-D Camera », in :
- HUANG, X., F. NAGHDY, G. NAGHDY, H. DU et C. TODD (2018), « The Combined Effects of Adaptive Control and Virtual Reality on Robot-Assisted Fine Hand Motion Rehabilitation in Chronic Stroke Patients : A Case Study », in : DOI : 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2017.08.027.
- HUANG, Yu-Chih, Sheila J BACKMAN, Kenneth F BACKMAN, Francis A MCGUIRE et DeWayne MOORE (2019), « An investigation of motivation and experience in virtual

-
- learning environments : a self-determination theory », in : *Education and Information Technologies* 24.1, p. 591-611.
- HÜLSMANN, Felix, Jan Philip GÖPFERT, Barbara HAMMER, Stefan KOPP et Mario BOTSCH (2018), « Classification of motor errors to provide real-time feedback for sports coaching in virtual reality — A case study in squats and Tai Chi pushes », in : *Computers & Graphics* 76, p. 47-59, ISSN : 0097-8493, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.cag.2018.08.003>.
- JEANNE, Florian (2017), « Métaphore d'interaction gestuelle en environnement virtuel : application à l'apprentissage de gestes », thèse de doct.
- JEANNE, Florian, Yann SOULLARD et Indira THOUVENIN (mar. 2016), « What is wrong with your gesture? An error-based assistance for gesture training in virtual environments », in : *2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, Greenville, United States : IEEE, p. 247-248, DOI : 10.1109/3DUI.2016.7460063.
- JEANNE, Florian, Indira THOUVENIN et Alban LENGLET (2017), « A Study on Improving Performance in Gesture Training through Visual Guidance Based on Learners' Errors », in : *Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, New York, NY, USA : Association for Computing Machinery.
- JIANG, Wei, Jin jin ZHENG, Hong jun ZHOU et Bing kai ZHANG (2016), « A new constraint-based virtual environment for haptic assembly training », in : *Advances in Engineering Software* 98, p. 58-68.
- JOSE, James, R UNNIKRISHNAN, Delmar MARSHALL et Rao R BHAVANI (2016), « Haptics enhanced multi-tool virtual interfaces for training carpentry skills », in : *2016 International Conference on Robotics and Automation for Humanitarian Applications (RAHA)*, IEEE, p. 1-6.
- JOUDIEH, Noura Amin (2021), *Development of Tools for the Automatic Generation of Simple 3D Shapes for the Analysis and Evaluation of Professional Gestures*, Lebanese University, URL : https://drive.google.com/file/d/1W5beInIH2CVu7WMqUKZTfz_QBEbLhXii/view?usp=sharing.
- KANBE, Atsushi et Yukihiro MATSUBARA (2011), « Consideration of the Training Possibility of Upper Extremity in the VR-based Throwing Environment by Physically Challenged Persons », in : *2011 International Conference on Biometrics and Kansei Engineering*, p. 161-164, DOI : 10.1109/ICBAKE.2011.35.
- KEIME, Josiah, Brandon HAYS, Antuan VAZQUEZ, Joshua MENA, James SAUERWALD et Hadeer SHWKET (2017), « Case study of custom virtual reality system for post stroke

-
- rehabilitation », in : *2017 International Conference on Virtual Rehabilitation (ICVR)*, p. 1-2, DOI : 10.1109/ICVR.2017.8007483.
- KHAMALLAH, Nawri, Renaud PLEITINX et Luca SGAMBI (2020), « La réalité virtuelle au service de l'apprentissage de la géométrie descriptive : retour vers Monge », in : *SHS Web of Conferences*, t. 82, EDP Sciences, p. 04001.
- KIKUKAWA, Fumitaka, Masato SOGA et Hirokazu TAKI (2014), « Development of a Gesture Learning Environment for Novices' Erhu Bow Strokes », in : *Procedia Computer Science* 35, p. 1323-1332.
- KIRAKOSIAN, S., E. MARAVELAKIS et K. MANIA (sept. 2019), « Immersive Simulation and Training of Person-to-3D Character Dance in Real-Time », in : *2019 11th International Conference on Virtual Worlds and Games for Serious Applications (VS-Games)*, Los Alamitos, CA, USA : IEEE Computer Society, p. 1-4, DOI : 10.1109/VS-Games.2019.8864530.
- KIRK, Adam G, James F O'BRIEN et David A FORSYTH (2005), « Skeletal parameter estimation from optical motion capture data », in : *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, t. 2, IEEE, p. 782-788.
- KITCHENHAM, Barbara et Stuart CHARTERS (jan. 2007), « Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering », in : 2.
- KITSIKIDIS, Alexandros, Kosmas DIMITROPOULOS, Erdal YILMAZ, Stella DOUKA et Grammalidis NIKOS (juin 2014), « Multi-sensor Technology and Fuzzy Logic for Dancer's Motion Analysis and Performance Evaluation within a 3D Virtual Environment », in : DOI : 10.1007/978-3-319-07437-5_36.
- KOJIMA, Taihei, Atsushi HIYAMA, Takahiro MIURA et Michitaka HIROSE (2014), « Training Archived Physical Skill through Immersive Virtual Environment », in : *Human Interface and the Management of Information. Information and Knowledge in Applications and Services*, sous la dir. de Sakae YAMAMOTO, Cham : Springer International Publishing, p. 51-58.
- KORA, Takahiro, Masato SOGA et Hirokazu TAKI (2015), « Golf Learning Environment Enabling Overlaid Display of Expert's Model Motion and Learner's Motion Using KINECT », in : *19th Annual Conference of Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems, KES-2015, Singapore, September 2015 Proceedings*, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.265>.

-
- KULPA, Richard, Franck MULTON et Bruno ARNALDI (sept. 2005), « Morphology-independent representation of motions for interactive human-like animation », in : *Comput. Graph. Forum*, p. 343-352, DOI : 10.1111/j.1467-8659.2005.00859.x.
- KUMAR, Pradeep, Rajkumar SAINI, Mahendra YADAVA, Partha Pratim ROY, Debi Prosad DOGRA et Raman BALASUBRAMANIAN (2017), « Virtual trainer with real-time feedback using kinect sensor », in : *2017 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)*, p. 1-5, DOI : 10.1109/TENCONSpring.2017.8070063.
- KYAN, Matthew, Guoyu SUN, Haiyan LI, Ling ZHONG, Paisarn MUNEEAWANG, Nan DONG, Bruce ELDER et Ling GUAN (mar. 2015), « An Approach to Ballet Dance Training through MS Kinect and Visualization in a CAVE Virtual Reality Environment », in : *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.* 6.2.
- LABAN, Rudolf et Lisa ULLMANN (1971), « The mastery of movement », in :
- LABAN, Rudolf Von et Lisa ULLMANN (1988), *Mastery of Movement*, Princeton Book Co Pub.
- LAHANAS, Vasileios, Constantinos LOUKAS, Konstantinos GEORGIU, Hani LABABIDI et Dania AL-JAROUDI (déc. 2017), « Virtual reality-based assessment of basic laparoscopic skills using the Leap Motion controller », in : *Surgical Endoscopy* 31, p. 1-12, DOI : 10.1007/s00464-017-5503-3.
- LAMBLIN, Gery, Gabriel THIBERVILLE, Loic DRUETTE, Stéphanie MORET, Sébastien COURAUD, Xavier MARTIN, Gil DUBERNARD et Gautier CHENE (2020), « Virtual reality simulation to enhance laparoscopic salpingectomy skills », in : *Journal of Gynecology Obstetrics and Human Reproduction* 49.3, p. 101685.
- LANDIS, J Richard et Gary G KOCH (1977), « The measurement of observer agreement for categorical data », in : *biometrics*, p. 159-174.
- LARABA, Sohaib et Joëlle TILMANNE (mai 2016), « Dance Performance Evaluation Using Hidden Markov Models », in : *Computer Animation and Virtual Worlds* 27, 321-329, DOI : 10.1002/cav.1715.
- LARBOULETTE, Caroline et Sylvie GIBET (2015), « A Review of Computable Expressive Descriptors of Human Motion », in : *2nd International Workshop on Movement and Computing*, p. 21-28.
- LE NAOUR, Thibaut, Ludovic HAMON et Jean-Pierre BRESCIANI (2019), « Superimposing 3D Virtual Self + Expert Modeling for Motor Learning : Application to the Throw in American Football », in : *Frontiers in ICT* 6, p. 16.

-
- LEE, Gyusung I et Mija R LEE (2018), « Can a virtual reality surgical simulation training provide a self-driven and mentor-free skills learning? Investigation of the practical influence of the performance metrics from the virtual reality robotic surgery simulator on the skill learning and associated cognitive workloads », in : *Surgical endoscopy* 32.1, 62—72.
- LEPLAT, Jacques (2013), « Les gestes dans l'activité en situation de travail », in : URL : <http://journals.openedition.org/pistes/2951>.
- LEVAC, Danielle E. et Heidi SVEISTRUP (2014), « Motor Learning and Virtual Reality », in : *Virtual Reality for Physical and Motor Rehabilitation*, New York, NY : Springer New York, p. 25-46, DOI : 10.1007/978-1-4939-0968-1_3.
- LEWIS, James R. (1995), « IBM computer usability satisfaction questionnaires : Psychometric evaluation and instructions for use », in : *International Journal of Human-Computer Interaction* 7.1, p. 57-78, DOI : 10.1080/10447319509526110.
- LIKITWEERAWONG, Kookiet et Patison PALEE (2018), « The virtual reality serious game for learning driving skills before taking practical test », in : *2018 International Conference on Digital Arts, Media and Technology (ICDAMT)*, p. 158-161, DOI : 10.1109/ICDAMT.2018.8376515.
- LIN, Han Hong, Ping Hsuan HAN, Kuan Yin LU, Chia Hung SUN, Pei Yi LEE, Yao Fu JAN, Amy Ming Sui LEE, Wei Zen SUN et Yi Ping HUNG (2018), « Stillness Moves : Exploring Body Weight-Transfer Learning in Physical Training for Tai-Chi Exercise », in : *Proceedings of the 1st International Workshop on Multimedia Content Analysis in Sports*, MMSports'18, Seoul, Republic of Korea : Association for Computing Machinery, 21–29.
- LIU, Wei-Kai et Chun-Yen CHANG (2018), « Virtual reality classroom applied to science education », in : *2018 23rd International Scientific-Professional Conference on Information Technology (IT)*, p. 1-4, DOI : 10.1109/SPIT.2018.8350861.
- LISBOA, Claiton L.V., Luciana NEDEL et Anderson MACIEL (2016), « A Study for Postural Evaluation and Movement Analysis of Individuals », in : *2016 XVIII Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)*, p. 122-126, DOI : 10.1109/SVR.2016.29.
- LIU, Huimin, Zhiquan WANG, Christos MOUSAS et Dominic KAO (2020a), « Virtual reality racket sports : virtual drills for exercise and training », in : *2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, IEEE, p. 566-576.
- LIU, Juan, Yawen ZHENG, Ke WANG, Yulong BIAN, Wei GAI et Dingyuan GAO (2020b), « A Real-time Interactive Tai Chi Learning System Based on VR and Motion Capture

-
- Technology », in : *Procedia Computer Science* 174, 2019 International Conference on Identification, Information and Knowledge in the Internet of Things, p. 712-719, ISSN : 1877-0509, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.06.147>.
- LIU, Meiyin, SangUk HAN et SangHyun LEE (juil. 2016), « Tracking-based 3D human skeleton extraction from stereo video camera toward an on-site safety and ergonomic analysis », in : *Construction Innovation* 16.3, p. 348-367.
- LO, Tian Tian, ZuoPeng XIAO et Henry YU (2019), « Designing 'Action Trigger' for Architecture Modelling Design within Immersive Virtual Reality », in : *CUMINCAD*.
- LOKE, Lian, Astrid T LARSEN et Toni ROBERTSON (2005), « Labanotation for design of movement-based interaction », in : *ACM International Conference Proceeding Series*, t. 123, p. 113-120.
- LOUKAS, Constantinos, Constantinos ROUSEAS et Evangelos GEORGIOU (mar. 2013), « The role of hand motion connectivity in the performance of laparoscopic procedures on a virtual reality simulator », in : *Medical & biological engineering & computing* 51, DOI : 10.1007/s11517-013-1063-4.
- LOURDEAUX, Domitile, Azzeddine BENABBOU, Lauriane HUGUET et Rémi LACAZE-LABADIE (2017), « HUMANS : suite logicielle pour la scénarisation d'environnements virtuels pour la formation à des situations socio-techniques complexes », in : *3e Conférence Nationale sur les Applications Pratiques de l'Intelligence Artificielle (APIA 2017)*, p. 61-68.
- LUO, Zhiqiang, Weiting YANG, Zhong Qiang DING, Lili LIU, I-Ming CHEN, Song Huat YEO, Keck Voon LING et Henry Been-Lirn DUH (2011), « "Left Arm Up!" Interactive Yoga training in virtual environment », in : *2011 IEEE Virtual Reality Conference*, p. 261-262, DOI : 10.1109/VR.2011.5759498.
- LYU, Shaw-Ruey, Yen-Kun LIN, Shian-Tang HUANG et Hong-Tzong YAU (juil. 2013), « Experience-based virtual training system for knee arthroscopic inspection », in : *Biomedical engineering online* 12, p. 63, DOI : 10.1186/1475-925X-12-63.
- MAHDI, Oussema, Lahcen OUBAHSSI, Claudine PIAU-TOFFOLON et Sébastien IKSAL (sept. 2019), « Towards an editor for VR-oriented educational scenarios », in : *The 14th European Conference on Technology Enhanced Learning*, Delft, Netherlands.
- MAJID, Mohd Saiful Hazam, W. KHAIRUNIZAM, K. IKRAM, L. M. JING, B. N. SAHYUDI, I ZUNAIDI, Mohd Asri ARIFFIN, A. S. BAKAR et Z. M RAZLAN (2018), « Performance evaluation of a VR-based arm rehabilitation using movement sequence pattern », in :

-
- 2018 IEEE 14th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA), p. 123-128, DOI : 10.1109/CSPA.2018.8368698.
- MANITSARIS, Sotiris, Dimitris GOUSSIOS et Alina GLUSHKOVA (juil. 2017), « Le numérique au service de la transmission du savoir-faire artisanal. Méthodes et outils numériques d'apprentissage du savoir gestuel de la poterie », in : *Tic&société*, URL : <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01692829>.
- MARCELO, M Wanderley et W Vines BRADLEY (2017), « Origins and functions of clarnettists' ancillary gestures », in : *Music and gesture*, Routledge, p. 165-191.
- MARION, Nicolas, Cédric BUCHE et Ronan QUERREC (2007), « Assistance pédagogique et didactique en environnement virtuel de formation », in : *Méthodes Computationnelles pour Modeles et Apprentissages en Sciences Humaines et Sociales*.
- MAYNE, Richard et Helen GREEN (2020), « Virtual reality for teaching and learning in crime scene investigation », in : *Science & Justice* 60.5, p. 466-472, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2020.07.006>.
- McKIGHT, Patrick E et Julius NAJAB (2010), « Kruskal-wallis test », in : *The corsini encyclopedia of psychology*, p. 1-1.
- MENOLOTTO, Matteo, Dimitrios-Sokratis KOMARIS, Salvatore TEDESCO, Brendan O'FLYNN et Michael WALSH (2020), « Motion capture technology in industrial applications : A systematic review », in : *Sensors* 20.19, p. 5687.
- MIGNOT, Émilie Gobin et Bertrand WOLFF (2021), « Former avec la réalité virtuelle », in :
- MIHAJLOVIC, Zeljka, Sinisa POPOVIC, Karla BRKIC et Kresimir COSIC (août 2018), « A System for Head-Neck Rehabilitation Exercises Based on Serious Gaming and Virtual Reality », in : *Multimedia Tools Appl.* 77.15, 19113–19137, DOI : 10.1007/s11042-017-5328-z.
- MIKI, Takehiro, Toshinori IWAI, Kazunori KOTANI, Jianwu DANG, Hideyuki SAWADA et Minoru MIYAKE (2016), « Development of a virtual reality training system for endoscope-assisted submandibular gland removal », in : *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery* 44.11, p. 1800-1805, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2016.08.018>.
- MILES, Helen C., Serban R. POP, Simon J. WATT, Gavin P. LAWRENCE et Nigel W. JOHN (2012), « A review of virtual environments for training in ball sports », in : *Computers & Graphics*, p. 714 -726, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.cag.2012.04.007>.

-
- MIZUYAMA, Hajime (août 2010), « A Semiotic Characterization of the Process of Teaching and Learning a Skilled Motion Taking Wok Handling as an Example », in : t. 43, p. 448-453, ISBN : 9783902661944, DOI : 10.3182/20100831-4-FR-2021.00079.
- MOESLUND, Thomas B et Erik GRANUM (2001), « A survey of computer vision-based human motion capture », in : *Computer vision and image understanding* 81.3, p. 231-268.
- MORAIS, Wagner O. de et Nicholas WICKSTRÖM (2011), « A serious computer game to assist Tai Chi training for the elderly », in : *2011 IEEE 1st International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH)*, p. 1-8, DOI : 10.1109/SeGAH.2011.6165450.
- MOREL, Marion (2017), « Modélisation de séries temporelles multidimensionnelles. Application à l'évaluation générique et automatique du geste sportif », thèse de doct.
- MOREL, Marion, Richard KULPA, Anthony SOREL, Catherine ACHARD et Séverine DUBUISSON (2016), « Automatic and Generic Evaluation of Spatial and Temporal Errors in Sport Motions », in : *11th International Conference on Computer Vision Theory and Applications*, p. 542-551.
- MOUATT, Brendan, Ashleigh E SMITH, Maddison L MELLOW, Gaynor PARFITT, Ross T SMITH et Tasha R STANTON (2020), « The use of virtual reality to influence motivation, affect, enjoyment, and engagement during exercise : A scoping review », in : *Frontiers in Virtual Reality* 1, p. 564664.
- NEGIN, Farhood, Pau RODRIGUEZ, Michal KOPERSKI, Adlen KERBOUA, Jordi GONZÀLEZ, Jeremy BOURGEOIS, Emmanuelle CHAPOULIE, Philippe ROBERT et Francois BREMOND (2018), « PRAXIS : Towards automatic cognitive assessment using gesture recognition », in : *Expert Systems with Applications* 106, p. 21-35, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.03.063>.
- NG, Kia, Tillman WEYDE, Oliver LARKIN, Kerstin NEUBARTH, Thijs KOERSELMAN et Bee ONG (jan. 2007), « 3D augmented mirror : A multimodal interface for string instrument learning and teaching with gesture support », in : *ICMI*, p. 339-345, DOI : 10.1145/1322192.1322252.
- NGUYEN, Van-Hanh, Frédéric MERIENNE et Jean-Luc MARTINEZ (avr. 2010), « Training-based on real-time motion evaluation for functional rehabilitation in virtual environment », in : *International Journal on Image and Graphics* 10.2, p. 235-250, DOI : 10.1142/S0219467810003755, URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01110998>.

-
- NOGUEIRA, Pedro (2011), « Motion capture fundamentals », in : *DOCTORAL SYMPOSIUM IN INFORMATICS ENGINEERING*, p. 303.
- NÕMM, Sven, Aaro TOOMELA et Jaroslav KULIKOV (2017), « Towards Modeling of Finger Motions in Virtual Reality Environment », in : *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics*, Cham : Springer International Publishing, p. 106-115.
- NOZAWA, Takayuki, Erwin WU et Hideki KOIKE (2019), « VR Ski Coach : Indoor Ski Training System Visualizing Difference from Leading Skier », in : *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, p. 1341-1342, DOI : 10.1109/VR.2019.8797717.
- NUMFU, Manoch, Andreas RIEL et Frederic NOEL (2019), « Virtual Reality Based Digital Chain for Maintenance Training », in : *Procedia CIRP* 84, 29th CIRP Design Conference 2019, 08-10 May 2019, Póvoa de Varzim, Portugal, p. 1069-1074, ISSN : 2212-8271, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.268>.
- OAGAZ, Hawkar, Breawn SCHOUN et Min-Hyung CHOI (2021), « Performance improvement and skill transfer in table tennis through training in virtual reality », in : *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*.
- OPPICI, Luca, Annika DIX et Susanne NARCISS (2021), « When is knowledge of performance (KP) superior to knowledge of results (KR) in promoting motor skill learning? A systematic review », in : *International Review of Sport and Exercise Psychology*, p. 1-25.
- ORDAZ, Néstor, David ROMERO, Dominic GORECKY et Héctor R. SILLER (2015), « Serious Games and Virtual Simulator for Automotive Manufacturing Education & Training », in : *Procedia Computer Science* 75, 2015 International Conference Virtual and Augmented Reality in Education, p. 267-274, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.247>.
- OSHITA, Masaki (2019), « Motion Volume : Visualization of Human Motion Manifolds », in : *The 17th International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*, VRCAI '19, Brisbane, QLD, Australia : Association for Computing Machinery, ISBN : 9781450370028.
- OUTAOUAIS, Université du Quebec en (jan. 2022), *Immersion / présence*, URL : <http://w3.uqo.ca/cyberpsy/index.php/immersion-et-presence/\#:~:text=La%20notion%20de%20pr%C3%A9sence%20est,lequel%20la%20personne%20est%20immerg%C3%A9e>.

-
- PARK, D. S., D. G. LEE, K. LEE et G. LEE (2017), « Effects of Virtual Reality Training using Xbox Kinect on Motor Function in Stroke Survivors : A Preliminary Study », in : *Journal of stroke and cerebrovascular diseases : the official journal of National Stroke Association*, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2017.05.019>.
- PEI, Wei, Guanghua XU, Min LI, Hui DING, Sicong ZHANG et Ailing LUO (août 2016), « A motion rehabilitation self-training and evaluation system using Kinect », in : p. 353-357.
- PELLAS, Nikolaos, Panagiotis FOTARIS, Ioannis KAZANIDIS et David WELLS (déc. 2019), « Augmenting the learning experience in Primary and Secondary school education : A systematic review of recent trends in augmented reality game-based learning », in : *Virtual Reality*, DOI : [10.1007/s10055-018-0347-2](https://doi.org/10.1007/s10055-018-0347-2).
- PIETTE, Patrice et Justine PASQUIER (2012), « Réalité virtuelle et rééducation », in : *Kinésithérapie, la Revue* 12.128, p. 38-41, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.kine.2012.07.003>.
- PILATI, Francesco, Maurizio FACCIO, Mauro GAMBERI et Alberto REGATTIERI (2020), « Learning manual assembly through real-time motion capture for operator training with augmented reality », in : *Procedia Manufacturing* 45, Learning Factories across the value chain – from innovation to service – The 10th Conference on Learning Factories 2020, p. 189-195, ISSN : 2351-9789, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.093>.
- PIRON, Lamberto, Andrea TUROLLA, Michela AGOSTINI, Carla ZUCCONI, Laura VENTURA, Paolo TONIN et Mauro DAM (juin 2010), « Motor Learning Principles for Rehabilitation : A Pilot Randomized Controlled Study in Poststroke Patients », in : *Neurorehabilitation and neural repair* 24, p. 501-8, DOI : [10.1177/1545968310362672](https://doi.org/10.1177/1545968310362672).
- PORTMAN, M.E., A. NATAPOV et D. FISHER-GEWIRTZMAN (2015), « To go where no man has gone before : Virtual reality in architecture, landscape architecture and environmental planning », in : *Computers, Environment and Urban Systems* 54, p. 376-384, ISSN : 0198-9715, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.05.001>.
- POSTOLACHE, Octavian, Filipe LOURENÇO, J. M. DIAS PEREIRA et Pedro GIRÃO (2017), « Serious game for physical rehabilitation : Measuring the effectiveness of virtual and real training environments », in : *2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, p. 1-6, DOI : [10.1109/I2MTC.2017.7969978](https://doi.org/10.1109/I2MTC.2017.7969978).

-
- RAJESWARAN, Pavithra, Na-Teng HUNG, Thenkurussi KESAVADAS, John VOZENILEK et Praveen KUMAR (2018), « AirwayVR : Learning Endotracheal Intubation in Virtual Reality », in : *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, p. 669-670, DOI : 10.1109/VR.2018.8446075.
- RAMADIJANTI, Nana, H. Fadilah FAHRUL et Dini Maulidiyah PANGESTU (2016), « Basic dance pose applications using kinect technology », in : *2016 International Conference on Knowledge Creation and Intelligent Computing (KCIC)*, p. 194-200, DOI : 10.1109/KCIC.2016.7883646.
- RAMÍREZ-FERNÁNDEZ, Cristina, Alberto L. MORÁN et Eloísa GARCÍA-CANSECO (2015), « Haptic feedback in motor hand virtual therapy increases precision and generates less mental workload », in : *2015 9th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth)*, p. 280-286, DOI : 10.4108/icst.pervasivehealth.2015.260242.
- REGAZZONI, Daniele, Giordano DE VECCHI et Caterina RIZZI (août 2014), « RGB cams vs RGB-D sensors : Low cost motion capture technologies performances and limitations », in : *Journal of Manufacturing Systems* 33, DOI : 10.1016/j.jmsy.2014.07.011.
- RUFFALDI, Emanuele et Alessandro FILIPPESCHI (2013), « Structuring a virtual environment for sport training : A case study on rowing technique », in : *Robotics and Autonomous Systems* 61.4, p. 390-397.
- RYAN, Richard M et Edward L DECI (2000), « Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being », in : *American psychologist* 55.1, p. 68.
- SAINSBURY, Ben *et al.* (2020), « Evaluation of a Virtual Reality Percutaneous Nephrolithotomy (PCNL) Surgical Simulator », in : *Frontiers in Robotics and AI* 6, DOI : 10.3389/frobt.2019.00145.
- SAITO, Kei, Katsutoshi MASAI, Yuta SUGIURA, Toshitaka KIMURA et Maki SUGIMOTO (2018), « Development of a Virtual Environment for Motion Analysis of Tennis Service Returns », in : *MMSports'18*, Seoul, Republic of Korea : Association for Computing Machinery, 59–66, ISBN : 9781450359818, DOI : 10.1145/3265845.3265854.
- SARAFIANOS, Nikolaos, Bogdan BOTEANU, Bogdan IONESCU et Ioannis A. KAKADIARIS (2016), « 3D Human pose estimation : A review of the literature and analysis of covariates », in : *Computer Vision and Image Understanding* 152, p. 1 -20, ISSN : 1077-3142.

-
- SCHILD, Jonas *et al.* (2018), « Applying Multi-User Virtual Reality to Collaborative Medical Training », in : *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, p. 775-776, DOI : 10.1109/VR.2018.8446160.
- SCHMIDT, Richard A. (1997), *Apprentissage moteur et performance*, Vigot Collection Sport + Enseignement.
- SCHMIDT, Richard A, Timothy D LEE, Carolee WINSTEIN, Gabriele WULF et Howard N ZELAZNIK (2011), *Motor control and learning : A behavioral emphasis*, Human kinetics, ISBN : 978-0736079617.
- SCHUBAUER, R et R RICKENMANN (2004), « Un dispositif expérimental de formation aux gestes professionnels », in : *Actes du symposium Recherche et intervention en didactiques*.
- SENECAL, Simon, Niels NIJDAM, Andreas ARISTIDOU et Nadia THALMANN (sept. 2020), « Salsa dance learning evaluation and motion analysis in gamified virtual reality environment », in : *Multimedia Tools and Applications* 79, DOI : 10.1007/s11042-020-09192-y.
- SENECAL, Simon, Niels A. NIJDAM et Nadia Magnenat THALMANN (2018), « Motion Analysis and Classification of Salsa Dance Using Music-related Motion Features », in : *Proceedings of the 11th Annual International Conference on Motion, Interaction, and Games*, New York : ACM, 11 :1-11 :10.
- SHEA, Charles (juil. 2002), « Principles derived from the study of simple skills do not generalize to complex skill learning », in : *Psychonomic bulletin & review* 9, p. 185-211, DOI : 10.3758/BF03196276.
- SHEN, Dennis, Yao LU et Sujit DEY (2015), « Motion data alignment for real-time guidance in avatar based physical therapy training system », in : *2015 17th International Conference on E-health Networking, Application & Services (HealthCom)*, IEEE, p. 238-244.
- SHIM, Jaehyuk, Youngnoh GOH, Hyejin KIM, Seungchan LIM et Daseong HAN (2018), « A Rowing Game Based on Motion Similarity of Two Players », in : *Proceedings of the 31st International Conference on Computer Animation and Social Agents, CASA 2018*, Beijing, China : Association for Computing Machinery, 83-85, DOI : 10.1145/3205326.3205362.
- SIE, M., Y. CHENG et C. CHIANG (2014), « Key motion spotting in continuous motion sequences using motion sensing devices », in : *2014 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, p. 326-331.

-
- SIGRIST, Roland, Georg RAUTER, Robert RIENER et Peter WOLF (fév. 2012), « Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning : a review », in : *Psychonomic bulletin & review* 20.1, 21—53, DOI : 10.3758/s13423-012-0333-8.
- SINITSKY, Daniel M., Bimbi FERNANDO, Henry POTTS, Panagis LYKLOUDIS, George HAMILTON et Pasquale BERLINGIERI (2020), « Development of a structured virtual reality curriculum for laparoscopic appendicectomy », in : *The American Journal of Surgery* 219.4, p. 613-621, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.amjsurg.2019.04.020>.
- SLATER, Mel et Sylvia WILBUR (1997), « A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE) : Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments », in : *Presence : Teleoperators & Virtual Environments* 6, p. 603-616.
- SROR, Lily, Michal VERED, Iuly TREGER, Shelly LEVY-TZEDEK, Mindy F. LEVIN et Sigal BERMAN (2019), « A virtual reality-based training system for error-augmented treatment in patients with stroke », in : *2019 International Conference on Virtual Rehabilitation (ICVR)*, p. 1-2, DOI : 10.1109/ICVR46560.2019.8994483.
- STRAATEN, Peter Van der et MJ SCHUEMIE (2000), « Interaction affecting the sense of presence in virtual reality », in : *Delft University of Technology, Faculty of Information Technology and System* 67.
- SUN, Shuyan, Xiaoli MENG, Lianying JI, Jiankang WU et Wai-Choong WONG (2010), « Adaptive sensor data fusion in motion capture », in : *2010 13th International Conference on Information Fusion*, p. 1-8, DOI : 10.1109/ICIF.2010.5711994.
- SWEE, Sim Kok, Lim Zheng YOU, Benny Wong Wei HANG et Desmond Kho Teck KIANG (2017), « Development of rehabilitation system using virtual reality », in : *2017 International Conference on Robotics, Automation and Sciences (ICORAS)*, p. 1-6, DOI : 10.1109/ICORAS.2017.8308045.
- TADAYON, Ramin, Troy MCDANIEL, Morris GOLDBERG, Pamela ROBLES-FRANCO, Jonathan ZIA, Miles LAFF, Mengjiao GENG et Sethuraman PANCHANATHAN (août 2015), « Interactive Motor Learning with the Autonomous Training Assistant : A Case Study », in : p. 495-506, ISBN : 978-3-319-20915-9, DOI : 10.1007/978-3-319-20916-6_46.
- TAKAHASHI, Kosuke, Dan MIKAMI, Mariko ISOGAWA, Yoshinori KUSACHI et Naoki SAIJO (2019), « VR-based Batter Training System with Motion Sensing and Performance Visualization », in : *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, p. 1353-1354, DOI : 10.1109/VR.2019.8798005.

-
- TANAKA, Yuki et Masahito HIRAKAWA (2016), « Efficient strength training in a virtual world », in : *2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)*, p. 1-2, DOI : 10.1109/ICCE-TW.2016.7521030.
- TCHOUNIKINE, Pierre (2002), « Pour une ingénierie des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain », in : *Revue I3 2.1*, p. 59-95, URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01434605>.
- TERZIMAN, Léo, Maud MARCHAL, Franck MULTON, Bruno ARNALDI et Anatole LÉCUYER (2011), « Short Paper : Comparing Virtual Trajectories Made in Slalom Using Walking-In-Place and Joystick Techniques », in : *Proceedings in JVRC11 : Joint Virtual Reality Conference of EGVE-EuroVR*, p. 55-58, DOI : 10.2312/EGVE/JVRC11/055-058.
- THIELE, Simon, Laurid MEYER, Christian GEIGER, Daniel DROCHTERT et Björn WÖLDECKE (2013), « Virtual archery with tangible interaction », in : *2013 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, p. 67-70, DOI : 10.1109/3DUI.2013.6550199.
- TOUSSAINT, Ben-Manson, Vanda LUENGO, Francis JAMBON et Jérôme TONETTI (2015), « From Heterogeneous Multisource Traces to Perceptual-Gestural Sequences : the Pe-Tra Treatment Approach », in : *Artificial Intelligence in Education*, p. 480-491.
- VADCARD, Lucile (2019), *Vers une didactique des gestes techniques - Enjeux pour la formation professionnelle en santé*, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Bourgogne Franche-Comté.
- VAUGHAN, Neil et Bogdan GABRYS (2020), « Scoring and assessment in medical VR training simulators with dynamic time series classification », in : *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 94, p. 103760.
- VAUGHAN, Neil, Nigel JOHN et Nigel REES (2019), « CPR Virtual Reality Training Simulator for Schools », in : *2019 International Conference on Cyberworlds (CW)*, p. 25-28, DOI : 10.1109/CW.2019.00013.
- WANG, Haoyu, Sheng JIANG et Jianhuang WU (2018), « A Virtual Reality Based Simulator for Training Surgical Skills in Procedure of Catheter Ablation », in : *2018 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)*, p. 247-248, DOI : 10.1109/AIVR.2018.00057.
- WEI, Wenchuan, Yao LU, Catherine D. PRINTZ et Sujit DEY (2015), « Motion Data Alignment and Real-Time Guidance in Cloud-Based Virtual Training System », in : *Proceedings of the Conference on Wireless Health, WH '15*, Bethesda, Maryland : Association for Computing Machinery, DOI : 10.1145/2811780.2811952.

-
- WINSTEIN, Carolee J et Richard A SCHMIDT (1990), « Reduced frequency of knowledge of results enhances motor skill learning », in : *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition* 16.4, p. 677.
- WITMER, Bob G. et Michael J. SINGER (juin 1998), « Measuring Presence in Virtual Environments : A Presence Questionnaire », in : *Presence : Teleoper. Virtual Environ* 7.3, 225–240, DOI : 10.1162/105474698565686.
- WU, Erwin, Takayuki NOZAWA, Florian PERTENEDER et Hideki KOIKE (2020), « VR Alpine Ski Training Augmentation using Visual Cues of Leading Skier », in : *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CV-PRW)*, p. 3836-3845, DOI : 10.1109/CVPRW50498.2020.00447.
- XU, Pengfei, zk WU, Xingce WANG, Yan FU et Ying HE (juin 2020), « An electromyogram-based tapping gesture model with differentiated vibration feedback by low-fidelity actuators », in : *Virtual Reality* 25, DOI : 10.1007/s10055-020-00458-2.
- YAMAOKA, Koji, Masataka UEHARA, Takeshi SHIMA et Yasuhisa TAMURA (2013), « Feedback of Flying Disc Throw with Kinect and its Evaluation », in : *Procedia Computer Science* 22, p. 912 -920.
- YAMAUCHI, Yasushi et Tae HAYASHIDA (2018), « A Virtual CPR (Cardio-Pulmonary Resuscitation) Learning System Using Motion Capture Device », in : *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2018*, Singapore : Springer Singapore, p. 387-391, ISBN : 978-981-10-9035-6.
- YANG, Xue et Yin LYU (2018), « Dance Posture Analysis Based on Virtual Reality Technology and Its Application in Dance Teaching », in : *Educational Sciences : Theory & Practice* 18.5.
- YOSHINAGA, Toshihiro et Masato SOGA (2015), « Development of a Motion Learning Support System Arranging and Showing Several Coaches' Motion Data », in : *Procedia Computer Science* 60, Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems 19th Annual Conference, KES-2015, Singapore, September 2015 Proceedings, p. 1497 -1505.
- (2018), « Motion Comparison Learning Support Environment for Learner's Motion synchronized with Archived Target Expert's Motion », in : *Procedia Computer Science* 126, Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems : Proceedings of the 22nd International Conference, KES-2018, Belgrade, Serbia, p. 2153-2162, ISSN : 1877-0509, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.237>.

-
- YU, Wang, Guo SSHUXIANG, Tamiya TAKASHI, Hirata HIDEYUKI, Ishihara HIDENORI et Yin XUANCHUN (2016), « A virtual-reality simulator and force sensation combined catheter operation training system and its preliminary evaluation », in : t. 13, 3, DOI : 10.1002/rcs.1769.
- YVES, Reuter, Cohen-Azria CORA, Bertrand DAUNAY, Delcambre ISABELLE et Lahanier-Reuter DOMINIQUE (2013), « Évaluation », in : p. 101-105, DOI : 10.3917/dbu.reute.2013.01.0101.
- ZAHEDI, Ehsan, Hadi RAHMAT-KHAH, Javad DARGAHI et Mehrdad ZADEH (2017), « Virtual reality based training : Evaluation of user performance by capturing upper limb motion », in : *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*, p. 255-256, DOI : 10.1109/VR.2017.7892273.
- ZAHIRI, Mohsen, Ryan BOOTON, Ka-Chun SIU et Carl A. NELSON (déc. 2016), « Design and Evaluation of a Portable Laparoscopic Training System Using Virtual Reality », in : *Journal of Medical Devices* 11.1, ISSN : 1932-6181, DOI : 10.1115/1.4034881.
- ZÉNOUDA, Hervé (2012), « Son, interaction, immersion et effets de présence », in : *6èmes journées scientifiques de l'Université du Sud Toulon-Var*.
- ZHANG, Xiu-Wei, Fong-Ming SHYU et Geeng-Neng YOU (2018), « The exergame for Tae-Bo learning with virtual reality », in : *2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI)*, p. 1018-1021, DOI : 10.1109/ICASI.2018.8394448.

ANNEXES

A Numérotation des articles de l'analyse bibliographique

Numéros	Références	Numéros	Références
1	ADOLF <i>et al.</i> , 2019	2	AKANMU <i>et al.</i> , 2020
3	ANDERSON <i>et al.</i> , 2013	4	BALDOMINOS <i>et al.</i> , 2015
5	BELLARBI <i>et al.</i> , 2019	6	BLUMSTEIN <i>et al.</i> , 2020
7	BUESCHER <i>et al.</i> , 2018	8	CHAN <i>et al.</i> , 2011
9	CHANG <i>et al.</i> , 2015	10	CANNAVÒ <i>et al.</i> , 2018
11	CANNON <i>et al.</i> , 2014	12	CHEN <i>et al.</i> , 2015
13	CHIANG <i>et al.</i> , 2018	14	DA DALTO <i>et al.</i> , 2010
15	DEL BIMBO <i>et al.</i> , 2017	16	CORRÊA <i>et al.</i> , 2019
17	EAVES <i>et al.</i> , 2011	18	FAZELI <i>et al.</i> , 2018
19	FANG <i>et al.</i> , 2014	20	FERREIRA <i>et al.</i> , 2020
21	FLUET <i>et al.</i> , 2017	22	FUKUMORI <i>et al.</i> , 2014
23	GALLEGOS-NIETO <i>et al.</i> , 2017	24	HAMENT <i>et al.</i> , 2017
25	HE <i>et al.</i> , 2017	26	HO <i>et al.</i> , 2018
27	HOSOKAWA <i>et al.</i> , 2017	28	HUANG <i>et al.</i> , 2018
29	HÜLSMANN <i>et al.</i> , 2018	30	JEANNE <i>et al.</i> , 2016
31	JEANNE <i>et al.</i> , 2017	32	JIANG <i>et al.</i> , 2016
33	KANBE <i>et al.</i> , 2011	34	KEIME <i>et al.</i> , 2017
35	KIKUKAWA <i>et al.</i> , 2014	36	KIRAKOSIAN <i>et al.</i> , 2019
37	KITSIKIDIS <i>et al.</i> , 2014	38	KOJIMA <i>et al.</i> , 2014
39	KUMAR <i>et al.</i> , 2017	40	KYAN <i>et al.</i> , 2015
41	LAHANAS <i>et al.</i> , 2017	42	LAMBLIN <i>et al.</i> , 2020
43	LARABA <i>et al.</i> , 2016	44	LE NAOUR <i>et al.</i> , 2019
45	CHEN <i>et al.</i> , 2019	46	LIN <i>et al.</i> , 2018
47	LIU <i>et al.</i> , 2020b	48	LISBOA <i>et al.</i> , 2016
49	LOUKAS <i>et al.</i> , 2013	50	LUO <i>et al.</i> , 2011
51	LYU <i>et al.</i> , 2013	52	MAJID <i>et al.</i> , 2018
53	MIHAJLOVIC <i>et al.</i> , 2018	54	MIKI <i>et al.</i> , 2016
55	MIZUYAMA, 2010	56	NEGIN <i>et al.</i> , 2018
57	NGUYEN <i>et al.</i> , 2010	58	HIROAKI <i>et al.</i> , 2011
59	NÖMM <i>et al.</i> , 2017	60	NOZAWA <i>et al.</i> , 2019
61	MORAIS <i>et al.</i> , 2011	62	HAGHIGHI OSGOUEI <i>et al.</i> , 2018
63	PARK <i>et al.</i> , 2017	64	PEI <i>et al.</i> , 2016
65	PILATI <i>et al.</i> , 2020	66	PIRON <i>et al.</i> , 2010
67	POSTOLACHE <i>et al.</i> , 2017	68	RAMADIJANTI <i>et al.</i> , 2016
69	RAMÍREZ-FERNÁNDEZ <i>et al.</i> , 2015	70	RUFFALDI <i>et al.</i> , 2013
71	SAITO <i>et al.</i> , 2018	72	SAINSBURY <i>et al.</i> , 2020
73	SENECAL <i>et al.</i> , 2020	74	SHEN <i>et al.</i> , 2015
75	SHIM <i>et al.</i> , 2018	76	SINITSKY <i>et al.</i> , 2020
77	SROR <i>et al.</i> , 2019	78	SWEE <i>et al.</i> , 2017
79	TADAYON <i>et al.</i> , 2015	80	TAKAHASHI <i>et al.</i> , 2019
81	TANAKA <i>et al.</i> , 2016	82	THIELE <i>et al.</i> , 2013
83	VAUGHAN <i>et al.</i> , 2019	84	VAUGHAN <i>et al.</i> , 2020
85	YU <i>et al.</i> , 2016	86	WEI <i>et al.</i> , 2015
87	WU <i>et al.</i> , 2020	88	XU <i>et al.</i> , 2020
89	YAMAUCHI <i>et al.</i> , 2018	90	YANG <i>et al.</i> , 2018
91	YOSHINAGA <i>et al.</i> , 2018	92	ZAHIRI <i>et al.</i> , 2016
93	ZHANG <i>et al.</i> , 2018	94	ZAHEDI <i>et al.</i> , 2017

TABLE A.1 – Numérotation des articles de l'étude bibliographique réalisée au chapitre 3

B Transformations des données

Le calcul de métriques à partir des données des Objets d'Intérêts (OI) passe par une transformation de ces données. Les données de chaque étape du geste considéré sont enregistrées en considérant les SCP de ces étapes comme étant l'origine d'un repère local. Cette méthode a pour objectif d'obtenir un mouvement comparable selon un même repère, peu importe la position et l'orientation initiale de l'utilisateur dans l'espace défini par le repère global de la scène où est réalisé le mouvement. En effet, le repère local a été considéré dans le cas où l'évaluation repose sur la comparaison de données géométriques et cinématiques (LARBOULETTE *et al.*, 2015) qui, pour certaines, doivent être indépendantes des variations de l'emplacement de l'utilisateur dans la scène virtuelle telles que la direction, la forme du mouvement (via le score du DTW), etc.

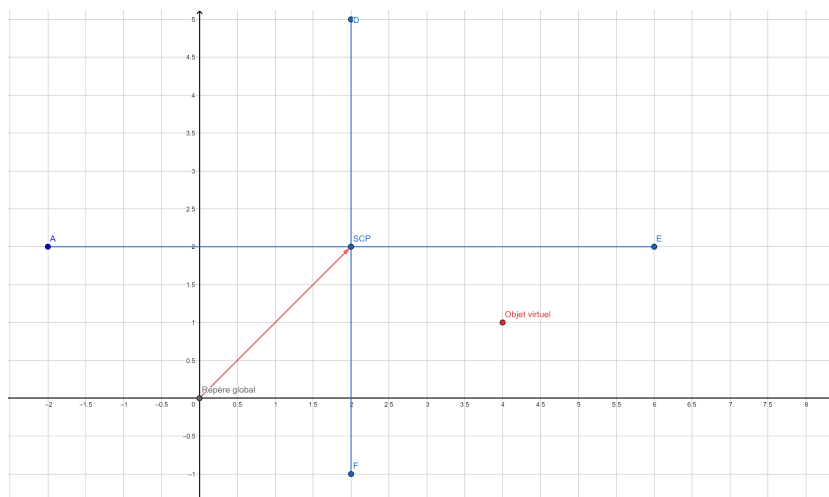


FIGURE A.1 – Changement de repère du monde virtuel au SCP

Le passage d'un repère à un autre nécessite un ensemble de traitements (*cf.* figure A.1). Il faut premièrement constituer la matrice homogène qui nous permettra de caractériser les différentes transformations de l'espace à réaliser par rapport au repère local considéré (*i.e.* celui du SCP). Nous nous intéresserons uniquement à la translation et à la rotation dans notre cas, étant donné que nous n'utilisons pas pour l'instant des données liées à la mise à l'échelle des objets virtuels manipulés. Pour produire cette matrice homogène, il faut créer les matrices de translation TL et de rotation RL avec les équations (a, b, c et d)².

2. https://www.utc.fr/~vberge/lo12/iso_album/cours4.pdf

Les équations (a, b et c) représentent les rotations sur chacun des axes (x, y et z). Dans le cas général, la matrice de rotation RL est représentée par un produit matriciel entre ces trois matrices (a, b et c). L'équation (d) est utilisée pour obtenir la matrice de translation TL du point considéré.

On obtient ainsi TRL à partir des coordonnées globales du nouveau repère local considéré (le SCP dans notre cas). Les coordonnées du SCP sont donc utilisées dans les équations (a), (b), (c) et (d).

$$(a) \quad R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (b) \quad R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(c) \quad R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (d) \quad T_{x,y,z} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & 0 & 0 & x \\ 0 & \mathbf{1} & 0 & y \\ 0 & 0 & \mathbf{1} & z \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} \end{bmatrix}$$

$$TRL = (TL \times RL)^{-1}, \quad \text{avec} \quad RL = (R_{\mathbf{SCP}_x}(\gamma) \times R_{\mathbf{SCP}_y}(\beta) \times R_{\mathbf{SCP}_z}(\alpha))^T \quad \text{et}$$

$$TL = (T_{\mathbf{SCP}_x, \mathbf{SCP}_y, \mathbf{SCP}_z})^T$$

Par la suite, il nous faut produire les matrices de translation et de rotation (respectivement TO et RO) de l'Objet Virtuel (OV) considéré. TO et RO sont respectivement obtenus comme TL et RL mais en considérant les coordonnées de l'objet virtuel pour construire les quatre matrices de transformations respectives. À partir de TO et RO , nous obtenons TRO . Enfin les coordonnées locales de l'objet virtuel sont obtenus grâce au produit matriciel ($TRLO$) entre TRL et TRO . La position de l'objet virtuel dans le repère locale (SCP) correspond à VO_t et la rotation est obtenu grâce à une fonction capable de convertir la matrice $TRLO$ en quaternion³.

3. <http://www.euclideanspace.com/maths/geometry/rotations/conversions/matrixToQuaternion/index.htm>

$$TO = (T_{VO_x, VO_y, VO_z})^T, \quad RO = (R_{\mathbf{VO}_x}(\gamma) \times R_{\mathbf{VO}_y}(\beta) \times R_{\mathbf{VO}_z}(\alpha))^T, \quad TRO = TO \times RO$$

$$TRLO = TRL \times TRO = \begin{bmatrix} M11 & M12 & M13 & M14 \\ M21 & M22 & M23 & M24 \\ M31 & M32 & M33 & M34 \\ M41 & M42 & M43 & M44 \end{bmatrix} \quad VO_l = \begin{bmatrix} X_l \\ Y_l \\ Z_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M14/M44 \\ M24/M44 \\ M34/M44 \end{bmatrix}$$

**C Questionnaire sur l'expérimentation du lancer de
fléchettes, billard et écriture d'une lettre**

Questionnaire utilisabilité

***Obligatoire**

1. Id

2. Age *

3. 1. Regarding the duration, I completed the tasks *

Plusieurs réponses possibles.

- ☐ Very slowly
- ☐ Slowly
- ☐ Quickly
- ☐ Very quickly
- ☐ Without opinion

4. 2. To learn using this system was *

Plusieurs réponses possibles.

- ☐ Very hard
- ☐ Hard
- ☐ Easy
- ☐ Very Easy
- ☐ Without opinion

5. 3. To use this system was *

Plusieurs réponses possibles.

- ☐ Very uncomfortable
- ☐ Uncomfortable
- ☐ Comfortable
- ☐ Very comfortable
- ☐ Without opinion

6. 4. The virtual menus were *

Plusieurs réponses possibles.

- ☐ Very improperly positionned
- ☐ Improperly positionned
- ☐ Properly positionned
- ☐ Very properly positionned
- ☐ Without opinion

7. 5. The information given by the system is *

Plusieurs réponses possibles.

- ☐ Very improperly organized
- ☐ improperly organized
- ☐ properly organized
- ☐ Very properly organized
- ☐ Without opinion

8. 6. Regarding the pool simulation, your demonstration was *

Plusieurs réponses possibles.

- ☐ Not satisfying at all
- ☐ Not satisfying
- ☐ Satisfaying
- ☐ Veryvsatisfaying
- ☐ Without opinion

9. 7. Regarding the darts simulation, your demonstration was *

Plusieurs réponses possibles.

- ☐ Not satisfying at all
- ☐ Not satisfying
- ☐ Satisfying
- ☐ Veryvsatisfying
- ☐ Without opinion

10. 8. If you have comments, please, write them below: *

Thank you for your participation !

Ce contenu n'est ni rédigé, ni cautionné par Google.

Google Forms

D Instructions suivies dans l'expérimentation portant sur la dilution d'une suspension de microbiologie

Instructions pour la réalisation de l'expérimentation sur l'éditeur de feedback dans une situation de dilution d'une suspension en microbiologie

1. Première partie : créer les feedbacks et les déclencheurs définis ci-dessous afin d'atteindre les objectifs pédagogique associés

- **Objectif pédagogique 1 : flamber (stériliser) l'entrée du tube à essais contenant le liquide à diluer**

Créer un feedback avec les paramètres suivants :

- Type : **HapticFeedback**
- Objet d'intérêt : **LeftHand**
- Durée : **1**
- Amplitude : **10**
- Fréquence : **10**

Créer le déclencheur associé au feedback précédent avec les paramètres suivants :

- Type : **SpatialTrigger**
- Spatial Object : **tube à essai contenant la solution bleu**
- Radius : **0,3**
- Second Spatial Object (OnBody : False) : **source de chaleur électrique**
- Number of activation : **-1**

- **Objectif pédagogique 2 : les deux mains ne doivent pas se toucher durant la réalisation de la tâche**

Créer un feedback avec les paramètres suivants :

- Type : **VisualFeedback**
- SubType : **Color**
- Observed : **BothHand**
- Duration : **1**
- Color : **red**

Créer le déclencheur associé au feedback précédent avec les paramètres suivants :

- Type : **Contact**
- First Object : **LeftHand**
- Second Object : **RightHand**
- Number of activation : **-1**

- **Objectif pédagogique 3 : les mouvements des mains doivent être fluide durant la réalisation de la tâche**

Créer un feedback avec les paramètres suivants :

- Type : **AudioFeedback**
- Sous-type : **Text**
- Texte : **“Prenez votre temps, soyez plus calme dans vos mouvements”**

Créer le déclencheur associé au feedback précédent avec les paramètres suivants :

- Type : **MetricTrigger**
- Number of activation : **2**
- Evaluated Object : **RightHand**
- Metric Type : **Jerk**
- Range : **50|100** (valeurs à ajuster)

Se passer des checkpoints pour les vitesses et les jerks

2. Deuxième partie : créer des feedbacks et des déclencheurs pour atteindre les objectifs pédagogiques définis ci-dessous

- **Objectif pédagogique 1 : le tube à essai contenant le liquide bleu doit être tenu à la vertical**
- **Objectif pédagogique 2 : les mains de l'utilisateur ne doivent pas sortie de la zone de travail**
- **Objectif pédagogique 3 : la pipette doit être tenu à l'horizontal**

3. Troisième partie : définissez un ou plusieurs objectifs pédagogiques (3 au maximum). Formalisez les par écrit et créez les feedbacks et déclencheurs associés.

E Objectifs pédagogiques troisième partie

Numéros	Objectifs pédagogiques	Numéros	Objectifs pédagogiques
1	Passer le tube au vortex avant de prélever	2	Placer la pipette dans le bêcher de contenant la liquide de nettoyage (javel) après prélèvement
3	La pipette doit bien être fixée sur la pro-pipette	4	Agiter le tube avant prélèvement et après dilution
5	La pipette ne doit pas toucher le liquide dans le deuxième tube on vidant le liquide	6	Le tube à essai (avec le liquide bleu) doit être homogénéiser avant de l'ouvrir
7	Le tube doit être flambé à l'ouverture	8	La pipette doit être jetée dans la javel
9	Passer le tube contenant la suspension au vortex avant de prélever	10	Après le prélèvement, repositionner le tube bleu sur le portoir mais sur un autre emplacement
11	Avoir un signal lumineux ou sonore lorsque l'ordre des étapes n'est pas respecté	12	Le tube bleu, une fois rebouché doit être remis à son emplacement initial
13	La pipette doit être saisie avec la main droite et non la main gauche	14	Prendre la pro-pipette
15	Homogénéiser le tube contenant le liquide bleu	16	La pipette doit être saisie avec la main droite et non la main gauche

TABLE A.2 – Ensemble des objectifs pédagogiques définis par les enseignants dans la partie 3 de l'expérimentation du chapitre 5

F Questionnaire F-SUS

Questionnaire Utilisabilité RV

***Obligatoire**

1. Identifiant *

2. Sexe *

Une seule réponse possible.

☐ Femme

☐ Homme

3. Âge *

4. Questions *

Une seule réponse possible par ligne.

	1. Pas du tout d'accord	2	3	4	5. Tout à fait d'accord
1. Je voudrais utiliser ce système fréquemment	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2. Ce système est inutilement complexe	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3. Ce système est facile à utiliser	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
4. J'aurais besoin du soutien d'un technicien pour être capable d'utiliser ce système	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
5. Les différentes fonctionnalités de ce système sont bien intégrées	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6. Il y a trop d'incohérences dans ce système	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
7. La plupart des gens apprendront à utiliser ce système très rapidement	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
8. Ce système est très lourd à utiliser	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
9. Je me suis senti-e très en confiance en utilisant ce système	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
10. J'ai eu besoin	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

**d'apprendre
beaucoup de
choses avant de
pouvoir utiliser ce
système**

Merci pour votre participation !

Ce contenu n'est ni rédigé, ni cautionné par Google.

Google Forms

G Questionnaire sur l'analyse des concepts utilisés dans l'éditeur de feedback

Editeur de feedback : questionnaire sur les concepts proposés

Merci de nous faire part de vos commentaires concernant l'éditeur de feedback que vous venez d'utiliser notamment à propos de son utilité du point de vue pédagogique.

***Obligatoire**

1. Identifiant *

Questions sur l'utilité des concepts proposés dans le contexte de l'activité de dilution

L'objectif est de mesurer l'utilité des feedbacks et des déclencheurs du point de vue pédagogique

2. Feedbacks *

Une seule réponse possible par ligne.

	1. Très inutile	2	3	4	5. Très utile
1. Le feedback visuel textuel est...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2. Le feedback visuel couleur est...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3. Le feedback audio à partir d'un fichier est...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
4. Le feedback audio à partir d'un texte est...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
5. Le feedback haptique (vibration) est...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

3. Déclencheurs *

Une seule réponse possible par ligne.

	1. Très inutile	2	3	4	5. Très utile
1. Le déclencheur sur le temps est...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2. Le déclencheur de contact est...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3. Le déclencheur spatial est...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
4. Le déclencheur sur les métriques est...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Questions sur l'utilité des concepts proposés dans un autre contexte (tout autre simulation pour l'apprentissage)

L'objectif est de mesurer l'utilité des feedbacks et des déclencheurs du point de vue pédagogique

4. Feedbacks *

Une seule réponse possible par ligne.

	1. Très inutile	2	3	4	5. Très utile
1. Le feedback visuel textuel pourrait être...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2. Le feedback visuel couleur pourrait être...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3. Le feedback audio à partir d'un fichier pourrait être...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
4. Le feedback audio à partir d'un texte pourrait être...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
5. Le feedback haptique (vibration) pourrait être...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

5. Déclencheurs *

Une seule réponse possible par ligne.

	1. Très inutile	2	3	4	5. Très utile
1. Le déclencheur sur le temps pourrait être...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2. Le déclencheur de contact pourrait être...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3. Le déclencheur spatial pourrait être...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
4. Le déclencheur sur les métriques pourrait être...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Autres questions

6. Questions *

Une seule réponse possible par ligne.

	1. Pas du tout d'accord	2	3	4	5. Tout à fait d'accord
Les feedbacks que vous avez créer vous ont permis d'atteindre vos objectifs...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Les déclencheurs que vous avez créer vous ont permis d'atteindre vos objectifs...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

L'objectif de l'outil proposé est de créer des feedbacks et des déclencheurs afin d'aider et guider les étudiants lors de la réalisation d'une activité en réalité virtuelle

7. Si vous avez des suggestions d'amélioration ou des commentaires, merci de les indiquer ici

Merci pour votre participation !

Ce contenu n'est ni rédigé, ni cautionné par Google.

Google Forms

H Décomposition du protocole portant sur la dilution d'une suspension de microbiologie

Étapes du protocole lors d'une dilution dans un EVAH

PRÉLEVER LA SUSPENSION MICROBIENNE

Étape 1 : Prendre la pipette graduée située dans le bocal avec la main droite, prendre la propipette et la mettre sur la pipette (les mains et avant bras ne doivent pas se croiser). À partir de cette étape, l'extrémité de la pipette doit rester dans la zone stérile.

Étape 2 : Prendre le tube à essai (suspension microbienne) de la main gauche, poser le tube à essai sur le vortex (pour homogénéiser la suspension)

Étape 3 : Enlever le bouchon du tube à essai avec la main droite et stériliser le col du tube à essai (à partir de cette étape, le tube ouvert doit rester dans la zone stérile)

Étape 4 : Faire rentrer la pipette dans le tube à essai (**maintenir la pipette et le tube à essai à la verticale lors du prélèvement**), aspirer la suspension, vérifier/ajuster la quantité prélevée (cycle aspiration-refoulement)

Étape 5 : Retirer la pipette du tube à essai et **la positionner à l'horizontal**, stériliser le col du tube à essai et remettre le bouchon sur le tube à essai

Étape 6 : Reposer le tube à essai sur le portoir en décalant au moins d'une ligne

VERSER LA SUSPENSION MICROBIENNE DANS LE DILUANT

Étape 7 : Prendre le tube à essai (diluant) de la main gauche, enlever le bouchon du tube à essai avec la main droite et stériliser le col du tube à essai (à partir de cette étape le tube ouvert doit rester dans la zone stérile)

Étape 8 : Faire rentrer la pipette dans le tube à essai (maintenir la **pipette à la verticale et le tube à essai penché**, avec la pointe de la pipette au contact de la paroi du tube) et refouler la suspension

Étape 9 : Retirer la pipette du tube à essai, stériliser le col du tube à essai et remettre le bouchon

Étape 10 : Passer le tube sur le vortex (pour homogénéiser la suspension) puis le reposer sur le portoir en décalant au moins d'une ligne

Étape 11 : Placer la pipette dans le bocal d'eau de javel

Pour refaire une dilution, recommencer à l'étape 1 et répéter l'ensemble des étapes en utilisant la dernière suspension bactérienne obtenue.

I Questionnaire sur l'analyse de l'ordre des actions

Questionnaire d'évaluation de l'ordre d'exécution des actions

***Obligatoire**

1. Identifiant *

Questions sur l'ordre des étapes

Choisissez le bon numéro d'ordre pour chaque action

2. L'ordre des étapes du prélèvement *

Une seule réponse possible par ligne.

	1	2	3
Flamber après prélèvement	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Flamber avant prélèvement	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Homogénéiser (Vortex) avant prélèvement	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

3. L'ordre des étapes de l'injection *

Une seule réponse possible par ligne.

	1	2	3	4
Ne pas toucher le diluant avec la pipette lors de l'injection	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Homogénéiser (Vortex) après injection	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Flamber après injection	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Flamber avant injection	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Merci pour votre participation !

Ce contenu n'est ni rédigé, ni cautionné par Google.

Google Forms

J Questionnaire sur l'auto-évaluation des apprenants

Questionnaire d'auto-évaluation des compétences

***Obligatoire**

1. Identifiant *

2. Compétences procédurales, de façon générale, vous avez : *

Une seule réponse possible par ligne.

	1. Je n'ai jamais pensé à le faire	2. Je l'ai fait de temps en temps	3. Ne sais pas / ne se prononce pas	4. Je l'ai fait régulièrement (peut-être il y a t-il eu quelques oublis)	5. Je l'ai fait systématiquement
Homogénéiser (Vortex) avant prélèvement	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Flamber avant prélèvement	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Flamber après prélèvement	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Flamber avant injection	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ne pas toucher le diluant avec la pipette lors de l'injection	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Flamber après injection	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Homogénéiser (Vortex) après injection	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

3. Compétences gestuelles *

Une seule réponse possible par ligne.

	1. Très mal fait	2	3	4	5. Très bien fait
Tube à la verticale lors du Prélèvement	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Pipette à la verticale lors du Prélèvement	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Pipette horizontale (de l'après Prélèvement à l'avant Injection)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Tube penché lors de Injection	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Pipette à la verticale lors de Injection	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ne pas trembler durant la dilution	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Rester à une bonne distance de la zone de stérilité	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Merci pour votre participation !

Ce contenu n'est ni rédigé, ni cautionné par Google.

Google Forms

K Questionnaire sur l'évaluation des apprenants

Fiche d'évaluation des compétences

***Obligatoire**

1. Identifiant *

2. Compétences procédurales, de façon générale, vous avez : *

Une seule réponse possible par ligne.

	1. Réalisée	2. Non réalisée
Homogénéiser (Vortex) avant prélèvement	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Flamber avant prélèvement	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Flamber après prélèvement	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Flamber avant injection	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ne pas toucher le diluant avec la pipette lors de l'injection	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Flamber après injection	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Homogénéiser (Vortex) après injection	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

3. Compétences gestuelles *

Une seule réponse possible par ligne.

	1. Très mal fait	2	3	4	5. Très bien fait
Tube à la verticale lors du Prélèvement	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Pipette à la verticale lors du Prélèvement	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Pipette horizontale (de l'après Prélèvement à l'avant Injection)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Tube penché lors de Injection	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Pipette à la verticale lors de Injection	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ne pas trembler durant la dilution	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Rester à une bonne distance de la zone de stérilité	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Ce contenu n'est ni rédigé, ni cautionné par Google.

Google Forms

L Tableaux complets des tests statistiques

		Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Shapiro-Wilk ($p > 0.05$)		0.004	0.209	0.154	0.242
D'Agostino-Pearson ($p > 0.05$)		0.003	0.428	0.397	0.271
ANOVA ($p < 0.05$)		0.061	0.221	0.637	0.769
Pairwise T-test ($p < 0.05$)	G1 - G2	0.013	0.214	0.73	0.479
	G1 - G3	0.045	0.038	0.415	0.733
	G2 - G3	0.606	0.394	0.47	0.62
Kruskal Wallis ($p < 0.05$)		0.05	0.157	0.452	0.73
Pairwise Mann-Whitney ($p < 0.05$)	G1 - G2	0.04	0.237	0.481	0.443
	G1 - G3	0.034	0.071	0.237	0.678
	G2 - G3	1	0.407	0.547	0.74

TABLE A.3 – Résultats des tests statistiques en intergroupe (temps utilisé pour réaliser la tâche)

		Shapiro-Wilk ($p > 0.05$)	D'Agostino-Pearson ($p > 0.05$)	T Test ($p < 0.05$)	Wilcoxon Signed-Rank ($p < 0.05$)
Essai 1-2	G1	0.145	0.093	$2.19e^{-4}$	$1.61e^{-3}$
	G2	0.326	0.132	$1.02e^{-6}$	$6.53e^{-4}$
	G3	$6.95e^{-4}$	$3.63e^{-4}$	$1.15e^{-3}$	0.0023
Essai 1-3	G1	0.135	0.074	$3.95e^{-6}$	$6.53e^{-4}$
	G2	0.076	0.142	$5.94e^{-6}$	$6.5e^{-4}$
	G3	0.0011	0.0013	$3.35e^{-5}$	$8.03e^{-4}$
Essai 1-4	G1	0.065	0.021	$3.18e^{-5}$	$7.99e^{-4}$
	G2	0.226	0.157	$1.14e^{-5}$	$6.53e^{-4}$
	G3	$7.47e^{-4}$	0.0011	$2.65e^{-5}$	$6.54e^{-4}$
Essai 2-3	G1	0.06	0.189	$8.1e^{-3}$	0.01
	G2	0.424	0.292	$8.92e^{-3}$	0.01
	G3	0.143	0.4	0.013	0.015
Essai 2-4	G1	0.056	0.147	0.078	0.139
	G2	0.62	0.657	0.035	0.657
	G3	0.055	0.126	0.001	0.0021
Essai 3-4	G1	0.068	0.308	0.641	0.531
	G2	0.035	$2.55e^{-3}$	0.505	0.396
	G3	0.211	0.319	0.417	0.683

TABLE A.4 – Résultats des tests statistiques en intragroupe (temps utilisé pour réaliser la tâche)

	Essai 1			Essai 2			Essai 3		
	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Shapiro-Wilk ($p > 0.05$)	0.11	$4.8e^{-3}$	0.159	$8.8e^{-3}$	0.197	0.161	0.004	$7.37e^{-4}$	0.0426
D'Agostino-Pearson ($p > 0.05$)	0.45	$4.83e^{-4}$	0.788	0.091	0.2	0.7	0.15	0.011	0.042
Pairwise T-test ($p < 0.05$)	0.415	0.212	0.156	0.35	0.56	0.241	0.021	0.756	0.015
Pairwise Mann-Whitney ($p < 0.05$)	0.506	0.254	0.253	0.28	0.481	0.115	0.1	0.967	0.073

TABLE A.5 – Résultats des tests statistiques en intergroupe de la compétence « tube et pipette à la verticale »

		Shapiro-Wilk ($p > 0.05$)			D'Agostino-Pearson ($p > 0.05$)			T Test ($p < 0.05$)			Wilcoxon Signed-Rank ($p < 0.05$)		
		N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Essai 1-2	G2	0.032	0.135	0.146	0.058	0.149	0.9	0.813	0.269	0.752	0.7	0.3	0.924
	G3	0.059	0.013	0.11	0.456	0.005	0.889	0.958	0.985	0.983	0.82	0.776	0.8
Essai 1-3	G2	0.016	0.003	0.359	0.018	0.014	0.64	0.435	0.684	0.897	0.382	0.875	0.916
	G3	0.06	0.002	0.037	0.196	0.004	0.2	0.212	0.462	0.349	0.306	0.394	0.753
Essai 2-3	G2	$8.44e^{-4}$	0.012	0.248	0.001	0.129	0.756	0.867	0.834	0.748	0.972	0.875	0.777
	G3	0.052	0.009	0.074	0.199	0.015	0.44	0.21	0.232	0.33	0.124	0.139	0.271

TABLE A.6 – Résultats des tests statistiques en intragroupe de la compétence « tube et pipette à la verticale »

	Essai 1			Essai 2			Essai 3		
	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Shapiro-Wilk ($p > 0.05$)	$1.28e^{-5}$	$5.65e^{-4}$	$4.57e^{-5}$	$8.78e^{-5}$	$6.92e^{-5}$	$6.24e^{-5}$	$4.42e^{-5}$	$7.48e^{-5}$	$1.12e^{-4}$
D'Agostino-Pearson ($p > 0.05$)	0.065	0.15	$1.87e^{-7}$	0.034	0.049	$4.63e^{-10}$	0.065	0.09	$1.89e^{-7}$
Pairwise T-test ($p < 0.05$)	0.173	0.5	0.226	0.061	0.392	0.057	0.003	0.692	0.019
Pairwise Mann-Whitney ($p < 0.05$)	0.143	0.375	0.351	0.081	0.479	0.043	0.057	0.7	0.079

TABLE A.7 – Résultats des tests statistiques en intergroupe de la compétence « pipette à l'horizontale »

		Shapiro-Wilk ($p > 0.05$)			D'Agostino-Pearson ($p > 0.05$)			T Test ($p < 0.05$)			Wilcoxon Signed-Rank ($p < 0.05$)		
		N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Essai 1-2	G2	$1.73e^{-6}$	$7.66e^{-6}$	$1.22e^{-5}$	0.012	0.039	$6.61e^{-4}$	0.059	0.633	0.611	0.092	0.767	0.674
	G3	$7.41e^{-4}$	0.004	$6.36e^{-5}$	0.013	0.177	$4.35e^{-7}$	0.153	0.972	0.146	0.157	0.861	0.182
Essai 1-3	G2	$2.86e^{-7}$	$6.41e^{-6}$	$6.88e^{-6}$	0.002	0.052	0.029	0.746	0.815	0.757	0.441	0.959	0.798
	G3	0.001	0.004	$2.08e^{-4}$	0.004	0.246	$1.55e^{-5}$	0.217	0.581	0.283	0.154	0.582	0.388
Essai 2-3	G2	$1.57e^{-6}$	$1.45e^{-5}$	$2.52e^{-5}$	0.013	0.05	0.008	0.225	0.76	0.398	0.236	0.678	0.441
	G3	0.001	$2.6e^{-4}$	$3.98e^{-5}$	$1.74e^{-4}$	0.1	0.014	0.64	0.661	0.328	0.432	0.582	0.241

TABLE A.8 – Résultats des tests statistiques en intragroupe de la compétence « pipette à l'horizontale »

	Essai 1			Essai 2			Essai 3		
	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Shapiro-Wilk ($p > 0.05$)	$1.39e^{-6}$	$2.5e^{-3}$	$5.73e^{-4}$	$2.5e^{-6}$	$1.67e^{-4}$	$6.31e^{-4}$	$1.41e^{-5}$	$5.05e^{-5}$	0.002
D'Agostino-Pearson ($p > 0.05$)	0.002	0.003	0.028	0.001	0.009	0.131	0.002	$3.07e^{-4}$	0.129
Pairwise T-test ($p < 0.05$)	0.05	0.159	0.451	0.414	0.031	0.547	0.041	0.619	0.062
Pairwise Mann-Whitney ($p < 0.05$)	0.084	0.308	0.632	0.753	0.01	0.356	0.029	0.901	0.158

TABLE A.9 – Résultats des tests statistiques en intergroupe de la compétence « pipette à la verticale »

		Shapiro-Wilk ($p > 0.05$)			D'Agostino-Pearson ($p > 0.05$)			T Test ($p < 0.05$)			Wilcoxon Signed-Rank ($p < 0.05$)		
		N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Essai 1-2	G2	$2.09e^{-7}$	0.008	0.001	$3.82e^{-4}$	0.11	0.05	0.193	0.352	0.055	0.313	0.362	0.064
	G3	$1.83e^{-5}$	$2.21e^{-4}$	$3.82e^{-4}$	0.032	0.002	0.12	0.858	0.565	0.7	0.593	0.272	0.722
Essai 1-3	G2	$2.14e^{-8}$	0.004	$4.26e^{-4}$	$1.85e^{-5}$	0.149	0.001	0.559	0.557	0.955	0.483	0.394	0.924
	G3	$5.26e^{-4}$	$4.54e^{-6}$	0.004	0.069	$1.14e^{-8}$	0.15	0.537	0.764	0.354	0.48	0.972	0.432
Essai 2-3	G2	$4.13e^{-7}$	0.002	$9.99e^{-4}$	0.001	0.1	0.064	0.554	0.163	0.2	0.593	0.1	0.463
	G3	$5.54e^{-5}$	$2.3e^{-6}$	0.001	0.034	$2.77e^{-7}$	0.145	0.3	0.38	0.078	0.247	0.421	0.084

TABLE A.10 – Résultats des tests statistiques en intragroupe de la compétence « pipette à la verticale »

Titre : Méthodes et outils pour la création et l'évaluation de situations d'apprentissage de gestes en environnements virtuels

Mot clés : Environnement Virtuel pour l'Apprentissage Humain (EVAH), feedbacks pédagogiques, réalité virtuelle, évaluation des gestes, ingénierie des EVAH

Résumé : À partir de tout Environnement Virtuel (EV) existant, l'objectif principal de cette thèse est de fournir des modèles, méthodes et outils permettant aux enseignants de mettre en place et réutiliser des situations d'apprentissages dédiées à l'acquisition et l'amélioration de compétences gestuelles. La solution proposée prend en compte les besoins d'observations et les pratiques des formateurs et vise à minimiser les coûts de réingénierie. Par ailleurs, les activités réalisées par les apprenants sont évaluables automatiquement. Dans la première partie de cette thèse, nous proposons la plateforme MEVEL (Motion Evaluation in Virtual Environment for Learning) permettant l'enregistrement, l'extraction, le rejeu et la décomposition en étape du mouvement effectué par une partie du corps ou un objet manipulé en EV. MEVEL permet ensuite d'évaluer le mouvement réalisé par l'apprenant en le comparant avec des démonstrations réalisées en amont par l'enseignant (trajectoire, respect de la séquence d'actions, propriétés géométriques et cinématiques). Pour cela, l'enseignant est amené à choisir l'objet d'intérêt dont le mouvement est à observer, puis à créer des points de contrôles (CP) délimitant spatialement le début, la fin et l'ensemble des étapes séquentielles de ce mouvement. MEVEL a été testé par 18 participants en termes d'utilisabilité, d'utilité et d'exploitation des concepts sous-jacents, sur plusieurs tâches (lancer de fléchette, le tire au billard, et l'écriture d'une lettre). Dans l'optique d'intégrer les pratiques des enseignants et leurs besoins d'observation, d'analyse et de retours pédagogiques, nous avons mené une étude de la littérature.

Cette étude nous a permis d'identifier, dans le cadre de l'apprentissage de gestes en EV, les principales méthodes et métriques d'évaluation utilisées, les feedbacks (aides et retours) fournis aux apprenants ainsi que les verrous liés à la réingénierie de ces EV. Nous avons proposé en conséquence un modèle descriptif de feedbacks pédagogiques orienté vers l'apprentissage de geste. Il a été opérationnalisé au sein du système GEstural FEedback EDitor (GEFEED) qui permet de déclencher l'animation d'artefacts virtuels (e.g. couleur sur un objet, apparition d'un texte, déclenchement d'une vibration) guidant l'apprenant en fonction des mouvements effectués. L'ensemble du processus est défini de bout en bout par l'enseignant via un éditeur visuel dont le résultat peut être prévisualisé en EV. Une expérimentation, impliquant 10 enseignants dans le contexte d'une situation d'apprentissage de dilution en microbiologie, a donné des premiers résultats encourageants sur la validité du modèle, l'utilisabilité et l'utilité du système. Enfin, nous avons mené une expérimentation de plus grande ampleur afin d'évaluer l'impact sur l'apprentissage des aides et guides virtuels proposés lors de l'utilisation combinée des deux systèmes proposés (MEVEL et GEFEED). Ainsi, 45 personnes réparties sur trois groupes (sans assistance, avec les CPs et la trajectoire des mouvements, avec des feedbacks pédagogiques) avaient pour objectif d'apprendre à réaliser une opération de dilution. Les résultats montrent globalement que le temps utilisé pour réaliser la tâche s'améliore au fil des essais. Le groupe 3 est celui obtenant de meilleurs résultats en termes d'acquisition des compétences gestuelles. Par

ailleurs, l'EV de dilution avec les aides et guides proposés a obtenu un bon score d'utilisabilité auprès des participants.

Title: Methods and Tools for the Design and Evaluation of Gesture-Based Learning Situations in Virtual Environments

Keywords: Virtual Reality Learning Environment (VRLE), Pedagogical feedbacks, virtual reality, gestures evaluation, VRLE Engineering

Abstract: From any existing Virtual Environment (VE), the main goal of this PhD is to provide models, methods and tools allowing teachers to set up and reuse learning situations dedicated to acquisition and improvement of gestural skills. The proposed contribution considers the observation needs and the practices of the teachers and aims at minimizing the reengineering costs. Moreover, the activities performed by the learners can be automatically evaluated. In the first part of this work, we propose the MEVEL (Motion Evaluation in Virtual Environment for Learning) platform allowing the recording, extraction, replay and step decomposition of motions performed by a part of the body or a manipulated object in VE. MEVEL is then able to evaluate the learners' motions through a comparison process with teachers' ones (trajectory, respect for the sequence of actions, geometrics and kinematics properties). First, the teacher chooses the object of interest from which the motion must be observed. Then he creates CheckPoints (CP) spatially delimiting the beginning, the end and all the sequential steps of this gesture. MEVEL has been tested by 18 participants in terms of usability, usefulness and exploitation of the underlying concepts, on several tasks (dart throwing, pool shot, and letter writing). In order to integrate the practices of the teachers and their needs in terms of observation, analysis and pedagogical feedbacks, we study the related literature. In the context of gesture learning in VE, this allowed us to iden-

tify the main evaluation methods and metrics used, the feedbacks provided to the learners as well as the challenges linked to the reengineering of those VEs. Therefore, we propose a descriptive model representing pedagogical feedbacks dedicated to gesture learning. It was operationalized within the GEFEED system (GEstural Pedagogical FEedbacks EDi-tor) which allows activating the animation of a virtual artefact (e.g. color of an object, appearance of a text, triggering of vibration) guiding the learner according to the performed movement. The whole process is end-to-end defined by the teacher through a visual editor from which results can be previewed in VE. An experiment, involving 10 teachers in the context of dilution learning in microbiology, gave encouraging results on the model validity, the usability and the usefulness of the system. Finally, we conducted an experiment to assess the impact on learning of the virtual aids and guides offered by the dual use of the proposed systems (MEVEL and GEFEED). 45 people divided into three groups (without assistance, with CPs and motion trajectory, with pedagogical feedbacks) have to learn how to perform a dilution operation. The results show that the time used to complete the task improves throughout the trials. Group 3 is the one obtaining better results in terms of gestural skill acquisition. Furthermore, the dilution VE with aids and guides obtained a good usability score from the participants.