



HAL
open science

Etude et conception d'environnements de formation pertinents en Réalité Virtuelle

Jean-Daniel Taupiac

► **To cite this version:**

Jean-Daniel Taupiac. Etude et conception d'environnements de formation pertinents en Réalité Virtuelle. Autre [cs.OH]. Université Montpellier, 2020. Français. NNT : 2020MONT040 . tel-03161876

HAL Id: tel-03161876

<https://theses.hal.science/tel-03161876>

Submitted on 8 Mar 2021

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

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

**THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR
DE L'UNIVERSITE DE MONTPELLIER**

En Informatique

École doctorale : Information, Structures, Systèmes

Unité de recherche : LIRMM

**Étude et conception d'environnements de formation
pertinents en Réalité Virtuelle**

Présentée par Jean-Daniel TAUPIAC

Le 20 Juillet 2020

**Sous la direction de Olivier STRAUSS
et Nancy RODRIGUEZ**

Devant le jury composé de

**Jean-Marie BURKHARDT, Professeur, IFSTTAR
Ronan QUERREC, Professeur, ENIB
Sandra BRINGAY, Professeur, LIRMM
Jean-Pierre JESSEL, Professeur, IRIT**

**Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur**



**UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER**

"L'accélération continue est le propre des chutes, plutôt que des ascensions."

- Gustave Thibon, *L'échelle de Jacob* (1942) -

Remerciements

À l'heure où j'écris ces lignes, se clôture un chapitre d'un peu plus de quatre ans. Quatre années de pensées, de rencontres riches, d'échanges passionnants, suscitant à chaque occasion une précieuse émulation sur le plan personnel et intellectuel.

Alors qu'il est temps de laisser une bonne fois pour toutes ce petit périple de vie derrière moi, un petit pincement au cœur inattendu vient se mêler au soulagement d'avoir réussi à mener ce projet jusqu'au bout. Il me semble important de remercier celles et ceux m'ayant permis de l'accomplir.

Tout d'abord, je voudrais remercier mes rapporteurs, Jean-Marie Burkhardt et Ronan Querrec, pour avoir accepté de lire ce manuscrit, que je qualifierais volontiers de "dodu". Je me sens très honoré d'avoir bénéficié de leur œil avisé et de leur sens critique.

Je souhaite également remercier Sandra Bringay et Jean-Pierre Jessel, qui m'ont tout autant honoré en acceptant de composer mon jury.

Je souhaite ensuite naturellement remercier mes encadrants. Nancy Rodriguez, pour avoir accompagné ce projet de thèse dès ses prémices, puis pour m'avoir permis d'effectuer mes premiers balbutiements dans le domaine de la Réalité Virtuelle. Olivier Strauss, pour avoir dirigé la thèse. Ses conseils, son soutien, son accompagnement, ainsi que son expertise et sa vision dans le domaine statistique, furent à mes yeux une chance immense.

Il m'apparaît également important de remercier les différents acteurs industriels, ayant permis de mener à bien cette thèse dans le contexte du dispositif Cifre.

Je remercie la DRHAT (Direction des Ressources Humaines de l'Armée de Terre) et les Écoles Militaires de Draguignan, pour avoir permis et accompagné les expérimentations sur leurs apprenants dans un premier temps, puis les différentes communications qui en ont découlé. J'ai eu beaucoup de chance de pouvoir

Je remercie également Safran Helicopter Engines et plus particulièrement les équipes de Pierre Beney de l'académie de formation, pour avoir favorisé le développement des travaux autour de la formation aux compétences sociales, puis avoir aussi permis d'effectuer des expérimentations sur leurs apprenants.

Bien évidemment, je remercie Capgemini, pour m'avoir permis de réaliser cette thèse Cifre avec eux. Je me sens particulièrement redevable envers Michel Ostrowiecky, ancien manager de Capgemini Bayonne. Lui qui a immédiatement fait confiance à ce jeune stagiaire qui, plein d'aplomb et de culot, proposa l'idée un peu folle d'entreprendre un thèse ensemble. L'autonomie et la confiance qu'il m'accorda ensuite pendant ces années de thèse furent une immense chance et un privilège, auxquels j'ai essayé de me montrer digne à chaque instant.

Je remercie également à mes anciens collaborateurs, Martin, Quentin, Julien, Alexandre, Brice, Maxime, Arthur et tous ceux que j'oublie mais qui ont collaboré, de près ou de loin, sur des projets liés aux

travaux de thèse.

Je me dois aussi de remercier l'ensemble des collaborateurs de l'agence Capgemini de Bayonne. Outre leurs petites attentions bienveillantes quotidiennes à mon égard, ils ont toujours été volontaires pour expérimenter et formuler des retours. Cette aide a constitué un apport précieux pour mes travaux. Travailler à leur contact fut une réelle chance et une belle opportunité.

Je remercie également les différents chercheurs, interlocuteurs privilégiés au contact desquels je ressent avoir énormément appris, évolué et grandi. Que ce soit en laboratoires, en salons, en conférences ou lors rencontres jeune chercheurs, ces échanges ont façonné tant mon cheminement personnel, que celui de mes travaux.

Je remercie plus particulièrement mes collègues du LIRMM (Laboratoire Informatique de Robotique et de Microélectronique de Montpellier). Malgré mes passages intermittents, ils m'ont toujours accueilli avec gentillesse, bienveillance et franche camaraderie. J'espère que tous mes camarades de l'équipe ICAR retiendront le même plaisir que j'ai eu à échanger (parfois malicieusement) avec eux, tout comme celui à partager les différentes spécialités du Pays Basque venues se glisser malencontreusement dans mes valises.

Enfin, je ne peux pas conclure ces remerciements sans adresser mes pensées à mes proches. Témoins ou non de ces années de thèse, ils ont été une force quotidienne dans laquelle aller puiser pour mener à bien ce projet.

À mes amis, témoins réguliers de l'investissement entrepris pour mener à bien ces travaux. Leur bienveillance, leur compassion et leur écoute ont régulièrement été une force.

À mes colocataires, anciens et actuels. Spectateurs quotidiens des travaux de thèse, ils furent tantôt petits démons malicieux, tantôt anges bienveillants.

À ma maman, complexe, courageuse et bien plus forte qu'elle ne le pense. Elle fut tant pour moi un exemple de courage et de persévérance, qu'un soutien inconditionnel primordial.

À mon petit frère et ma petite sœur, piliers essentiels de ma vie. La fierté et l'amour que j'éprouve à leur égard, fut une force au quotidien.

À Denise, ma grand-mère, partie quelques mois avant que ne débute cette thèse. En écrivant ces lignes, j'ai une pensée émue pour cet exemple d'érudisme et de vivacité d'esprit. Le courage et la bienveillance qu'elle a témoigné au cours de sa vie, furent une profonde inspiration.

À Manette, mon autre grand-mère, pour laquelle j'ai une pensée toute autant émue. Probablement la première personne à m'avoir mis un livre entre les mains, aurait-elle cru que ce petit acte bienveillant m'amènerait ici ? Son amour inconditionnel est une force dans laquelle je puise à chaque instant.

Enfin, à Pierre, mon regretté grand-père, à qui je dédie ces travaux. À cet exemple de sagesse. Lui qui m'a assis devant mon premier ordinateur, lui qui me prenait sur ses genoux pour m'initier à l'informatique, lui qui m'a transmis ses rayures et sa curiosité... En me voyant m'aventurer dans les eaux troubles de la recherche, il aurait probablement souri avec beaucoup de malice. Le souvenir de ses valeurs morales, de sa générosité, de son altruisme et de sa sagesse guident chacun de mes choix au quotidien, vers un idéal de la personne que je souhaiterais être.

Table des matières

Table des figures	11
Liste des tableaux	15
Liste des acronymes	17
1 Introduction	19
I Réalité Virtuelle pour l'apprentissage	19
II Contexte des travaux	19
III Pertinence des environnements de formation en Réalité Virtuelle	20
IV Contributions	21
V Organisation du document	22
2 Fondements	25
I Terminologie propre à la formation	25
1. Formation et formation professionnelle	25
2. Apprentissage et apprenant	27
3. Contexte et connaissance	27
4. Aptitude, capacité et habileté	29
4.1. Aptitude	29
4.2. Capacité	29
5. Compétence, savoir, savoir-faire et savoir-être	30
6. Conclusion : représentation du cadre terminologique	35
II Réalité Virtuelle et technologies immersives	36
1. Réalité Virtuelle	37
2. Autres technologies immersives : Réalité Augmentée et Réalité Mixte	38
2.1. Définitions de la Réalité Augmentée	38
2.2. Définitions de la Réalité Mixte	39
III Interfaces, concepts fondamentaux et limites de la Réalité Virtuelle	41
1. Interfaces utilisées en Réalité Virtuelle	41
1.1. Interfaces sensorielles	42
1.2. Interfaces motrices	46
1.3. Interfaces sensorimotrices	48
2. Sensation de présence	49
2.1. Sensation de présence	49
2.2. Composantes principales de la sensation de présence et notions associées	49
2.3. Sensation de présence et apprentissage	51
3. Cybermalaises et incohérences sensorimotrices	51
IV Analyser la pertinence de conception l'outil de formation en Réalité Virtuelle	52
1. Pertinence de conception de l'outil immersif	53

1.1.	Évaluation de l'utilisabilité d'un outil	53
1.2.	Mesure de la sensation de présence	54
1.3.	Étude des cybermalaises	56
2.	Pertinence pédagogique de l'outil de formation	56
2.1.	Mesures subjectives pour évaluer la pertinence pédagogique	56
2.2.	Mesures objectives pour évaluer la pertinence pédagogique	57
3.	Tests et méthodologies statistiques	58
3.1.	Types de variables	59
3.2.	Valeur p (<i>p-value</i>)	60
3.3.	Méthodologie	60
4.	Conclusions sur l'analyse de la pertinence d'un outil de formation en Réalité Virtuelle	64
V	Conclusions sur les fondements	64
3	Contribution à l'apprentissage d'un savoir-faire procédural en Réalité Virtuelle	67
I	Contexte et problématiques	68
1.	Le système FÉLIN et sa lunette infrarouge (IR)	68
2.	Calibration de la lunette IR FÉLIN	68
2.1.	Procédure de calibration (ou " <i>réglages tireur</i> ")	68
2.2.	Méthode d'apprentissage actuelle : l'EAO FÉLIN	69
3.	Problématiques identifiées	70
II	État de l'art	71
1.	Apprentissage de savoir-faire procéduraux	71
2.	Fidélité et interfaces haptiques passives	72
3.	Conclusions de l'état de l'art	74
III	Le prototype FÉLIN VR	75
1.	Principe	75
2.	Implémentation	76
IV	Expérimentations	79
1.	Objectifs	79
1.1.	Pertinence de conception	79
1.2.	Pertinence pédagogique	79
2.	Processus expérimental	80
3.	Sujets	81
4.	Résultats	82
4.1.	Méthodologie	82
4.2.	Résultats de la première itération	82
4.3.	Résultats des répétitions	85
4.4.	Temps d'utilisation	88
4.5.	Discussions	89
5.	Perspectives des travaux	93
V	Conclusions	93
4	Contribution à la formation aux compétences sociales en Réalité Virtuelle	95
I	Les compétences sociales	96
1.	Définition des compétences sociales	96
2.	Les habiletés sociales	98
II	Contexte et problématiques liés à la formation aux compétences sociales	98
1.	Compétence commerciale : la négociation client	99
2.	Compétence managériale : la communication d'équipe	101
3.	Problématiques communes de formation	103
3.1.	Manque de réalisme et de contextualisation	103
3.2.	Impact de la subjectivité dans l'évaluation	103
3.3.	Capitalisation sur l'expérience	104
III	État de l'art	104
1.	Formation à la négociation	104
1.1.	Savoir-faire cognitifs de négociation	105
1.2.	Négociations en contexte inter-culturel	106
1.3.	Entretiens d'embauche	107

2.	Prises de parole publiques et délicates	108
2.1.	Prises de parole en public	108
2.2.	Prises de parole délicates	110
3.	Autres cas d'usage	111
4.	Analyse des usages	113
4.1.	Utilisation des technologies immersives	113
4.2.	Utilisation des agents conversationnels incarnés	114
5.	Précautions et bonnes pratiques	116
5.1.	Capitalisation de modèles métier existants	116
5.2.	Contournement de difficultés technologiques : le Magicien d'Oz	116
5.3.	Réalisme des personnages virtuels, vallée de l'étrange	117
5.4.	Précautions d'expérimentation	118
6.	Observations, pistes et perspectives relevées	118
7.	Conclusions de l'état de l'art	119
IV	L'Holodeck Safran	120
1.	Le prototype	120
1.1.	Application Réalité Virtuelle	120
1.2.	Panneau de contrôle formateur	121
1.3.	Scénarios	122
1.4.	Suivi d'objets réels	123
2.	Expérimentations	124
2.1.	Étude préliminaire	124
2.2.	Objectifs des expérimentations sur des utilisateurs finaux	124
2.3.	Processus expérimental	125
2.4.	Utilisabilité	131
2.5.	Sensations de présence et de présence sociale	133
2.6.	Cybermalaises	139
2.7.	Évolution des évaluations	143
2.8.	Autres marqueurs de pertinence pédagogique : conscience de soi et confiance en soi	148
2.9.	Utilisation de l'espace	149
2.10.	Autres éléments soulevés lors des entretiens oraux	156
2.11.	Discussions générales	156
2.12.	Conclusions des expérimentations	157
3.	Conclusions des travaux sur l'holodeck Safran	159
V	Conclusions sur la formation aux compétences sociales	160
5	Pertinence d'expressions faciales émotionnelles en Réalité Virtuelle	163
I	Problématiques liées aux expressions faciales émotionnelles	164
1.	Définir des expressions faciales émotionnelles représentatives	164
2.	Définir des niveaux d'intensité pertinents pour des expressions faciales émotionnelles	164
3.	Problématique des outils	165
4.	Nécessité d'une approche d'évaluation subjective	166
5.	Pertinence des expressions faciales émotionnelles de l'Holodeck Safran	166
II	État de l'art	167
1.	Méthodes d'animation faciales	167
2.	Définir une expression faciale émotionnelle sur un personnage virtuel	169
2.1.	<i>Facial Action Coding System</i> (FACS)	169
2.2.	Autres méthodes de définition d'expressions	171
3.	Évaluer la perception d'une expression faciale émotionnelle	172
4.	Fixer des niveaux d'intensité pour une expression faciale émotionnelle	173
5.	Conclusions de l'état de l'art	173
III	Dessin et évaluation d'expressions faciales émotionnelles en Réalité Virtuelle	174
1.	Démarche générale	174
2.	Utilisation de l'outil Character Creator 3 (CC3)	175
2.1.	Choix de l'outil	175
2.2.	Actions Units FACS et blendshapes CC3	175

3.	Expérimentations : dessin des expressions	176
3.1.	Sujets "dessinateurs"	176
3.2.	Prototype de dessin	176
3.3.	Processus expérimental pour le dessin des expressions	177
3.4.	Résultats du dessin des expressions	178
3.5.	Discussions sur le dessin des expressions	181
4.	Expérimentations : définition des niveaux d'intensité	183
4.1.	Prototype de tri	183
4.2.	Processus expérimental pour la définition des niveaux d'intensité	184
4.3.	Résultats de la définition des niveaux d'intensité	185
4.4.	Discussions sur la définition des niveaux d'intensité	190
5.	Expérimentations : pré-sélection des expressions	190
5.1.	Sujets "évaluateurs"	190
5.2.	Processus expérimental pour la pré-sélection des expressions	191
5.3.	Résultats de la pré-sélection des expressions	192
5.4.	Discussions sur la pré-sélection des expressions	194
6.	Expérimentations : évaluation des expressions	195
6.1.	Prototype d'évaluation	195
6.2.	Processus expérimental pour l'évaluation des expressions	196
6.3.	Résultats de l'évaluation des expressions	196
6.4.	Discussions sur l'évaluation des expressions	201
IV	Conclusions	205
6	Conclusion	207
I	Résumé des contributions	207
II	Limites des travaux	208
1.	Limites liées à l'utilisation d'échelles de mesure subjectives	208
2.	Limites de la méthodologie statistique	209
III	Perspectives	210
1.	Continuité des travaux	210
1.1.	Hypothèses soulevées	210
1.2.	Reprise et approfondissement des contributions	210
2.	Vers un modèle pour la conception d'outils de formation pertinents utilisant les technologies immersives	211
	Bibliographie	213
	Index	226
	Annexes	229

Table des figures

2.1	"Triangle de la formation" de Fabre [1]	26
2.2	Représentation de la typologie des connaissances en sciences cognitives par Bottecchia [2]	28
2.3	Les savoirs constitutif de la compétence	32
2.4	Représentation de la compétence sous forme "atomique" selon Jedliczka [3], rapporté par Bottecchia [2]	35
2.5	Représentation des notions terminologiques propres à la formation	36
2.6	Boucle de " <i>perception, décision, action</i> " de Fuchs [4]	37
2.7	Exemple d'applications de Réalité Virtuelle aux concepts fondamentaux à la fois divers et à la fois potentiellement similaires : simulateur de fauteuil roulant (Rodriguez [5], gauche), simulateur de conduite automobile (Themedu-Steinke et al. [6], centre), simulateur d'aviron (Rauter et al. [7], droite)	38
2.8	Exemple d'applications de Réalité Augmentée portant sur le même cas d'usage : la visite d'un musée (gauche : augmentation audio au Fitzwilliam Museum de Cambridge (Filippini et Bowen [8]); centre : augmentation mobile à l'Acropolis Museum d'Athènes (Khundam [9]); droite : musée des Plans-Reliefs de Paris	40
2.9	Continuum de virtualité de Milgram et Kishino [10]	40
2.10	Exemple d'applications de Réalité Mixte au concept similaire (interaction avec un personnage virtuel) mais aux implémentations diverses : dans le champ de vision (Wang et al. [11], gauche), dans l'environnement réel (Kenny et al. [12], droite)	41
2.11	Exemple de visiocasques : Google Daydream View (gauche) et HTC Vive (droite)	42
2.12	Exemple de visiocasque transparent : l'Hololens 2 de Microsoft	43
2.13	Exemple d'interfaces à écrans fixes : écran projeté (Riecke et al. [13], gauche) et salle immersive (Kainz [14] droite)	43
2.14	Exemple d'applications de Réalité Virtuelle sur des interfaces à écrans fixes : tablette (See et al. [15], gauche) et smartphone (droite)	44
2.15	Exemple d'interfaces d'écrans à dispositions variables : travaux de Leight et al. [16] sur grand écran (gauche) et dispositif zSpace (droite)	44
2.16	Exemple d'interfaces acoustiques intégrées aux visiocasques : casque stéréophonique du HTC Vive Pro (gauche) et dispositif sonore par conductance osseuse intégré au prototype VR Headset de Panasonic (droite), présenté lors du CES 2017	45
2.17	Exemple d'interfaces tactiles : gants tactiles Cybergloves (gauche, Billinghurst et Buxton [17] rapporté par Hasanuzzaman et Ueno [18]), veste vibrotactile Tactavest (centre, Lindeman et al. [19]) et dispositif de thermoception Ambiotherm (droite, Ranasinghe et al. [20])	45
2.18	Exemple d'interface olfactive : le dispositif commercial Feelreal	46
2.19	Exemple d'interfaces à simulation de mouvement : travaux de Codd et al. [21] sur un siège à stimulation de mouvements (gauche), dispositif commercial Icaros pro (droite, utilisé par Dkebska et al. [22])	46

2.20	Exemple d'interfaces de commande et d'interaction : contrôleur Vive Controller du visiocasque HTC Vive (gauche), pointeur spatialisé utilisé dans une salle immersive (centre, Winkes et Aurich [23]), gants connectés Manus VR Prime One (droite)	47
2.21	Exemple de plateformes directionnelles : tapis monodirectionnel (gauche, Dockx et al. [24]), tapis omnidirectionnel (centre, Robuffo et al. [25]), dispositif commercial de plateforme omnidirectionnelle Virtuix Omni (droite, utilisé par Dkebska et al. [22])	47
2.22	Exemple d'interfaces de localisation corporelle : capteur Vive Tracker (gauche, utilisé par Salvetti et al. [26]), combinaison de suivi de mouvements (centre, Hamilton-Giachristis et al. [27]), système Microsoft Kinect (droite)	48
2.23	Exemple d'interfaces sensorimotrices : Haption Virtuose 6D (gauche, Iacob et Popescu [28]) et gant à retour d'efforts Dexmo (droite)	48
2.24	Exemple de méthode de déplacement (téléportation) permettant de limiter les incohérences sensorimotrices (Berger et Bill [29])	52
2.25	Distribution des scores SUS par centiles selon Sauro [30]	54
2.26	Méthodologie statistique utilisée pour la comparaison de variables quantitatives et qualitatives ordinales	61
3.1	Soldat équipé du système FÉLIN, avec la lunette IR fixée sur le fusil FAMAS	68
3.2	Cible utilisée pour la procédure de calibration (gauche) et Point Moyen d'Impact (PMI, droite)	69
3.3	EAO FÉLIN, module d'entraînement aux réglages tireurs de la lunette infrarouge	70
3.4	Gavish et al. [31], formation aux procédures techniques de maintenance industrielle	71
3.5	Clavarelli et al. [32], apprentissage des bonnes pratiques de tir	72
3.6	IMTS, outil industriel de formation à l'utilisation d'armes anti-aériennes pour les soldats américains	72
3.7	Allen et al. [33], simulateurs d'apprentissage à la conduite selon différents niveaux de fidélité	73
3.8	Meehan et al. [34], étude de l'impact des interfaces haptiques passives (droite) sur la sensation de présence en environnement virtuel (gauche)	74
3.9	Rashid [35], étude de faisabilité de l'utilisation d'éléments sur étagère comme interfaces haptiques passives, pour la formation au maniement d'armes anti-aériennes	74
3.10	Procédure de réglages tireur de la lunette IR FÉLIN, et différences d'application entre l'EAO FÉLIN et le prototype FÉLIN VR	76
3.11	Cible modélisée avec PMI et corrections indiqués sur la cible (en rouge)	77
3.12	Affichage stéréoscopique avec la vue au travers de la lunette sur l'oeil droit	77
3.13	Support des contrôleurs et fusil FAMAS (gauche), masque adhésif ajouté au Vive Controller avant (droite)	78
3.14	Zone de téléportation	78
3.15	Processus expérimental pour les expérimentations du prototype FÉLIN VR	80
3.16	Résultats du questionnaire de présence IPQ	83
3.17	Résultats des <i>Questionnaires utilisateur</i>	83
3.18	Résultats des <i>Questionnaires apprentissage</i>	84
3.19	Écarts d'estimation des erreurs	85
3.20	Nombre d'erreurs commises par les sujets	86
3.21	Nombre d'itérations supplémentaires nécessaires afin d'atteindre un sans-faute	88
3.22	Temps passé sur la procédure, selon le support utilisé	89
4.1	Exemple : représentation de la compétence sociale de l'orateur	97
4.2	Représentation des compétences et des habiletés sociales	99
4.3	Représentation des savoirs identifiés du commercial, pour la compétence en négociation client	100
4.4	Représentation des savoirs identifiés du manager, pour la compétence à la communication d'équipe	102
4.5	Devault et al. [36], négociation à tour de rôle : personnage virtuel et scène de négociation abstraite	105
4.6	Traum et al. [37, 12], SASO-ST : personnage virtuel (gauche) et dispositif de Réalité Virtuelle (droite)	106
4.7	Lane et al. [38], BiLAT : scène virtuelle (à gauche) et situation de négociation avec un personnage virtuel (à droite)	106

4.8	Anderson et al. [39], projet TARDIS : recruteur virtuel	107
4.9	Hoque et al. [40], My Automated Conversation CoaCH (MACH)	108
4.10	Chollet et al. [41, 42, 43], Cicero : audience virtuelle (gauche) et dispositif de Réalité Mixte (droite)	109
4.11	Damian et al. [44], Logue : interfaces (gauche) et feedback (droite)	109
4.12	Schneider et al. [45], Presentation Trainer : interfaces (gauche) et feedback correctif (droite)	110
4.13	Pertaub et al. [46, 47], anxiété à la prise de parole en public : différents types d'audience	110
4.14	Kron et al. [48], MPathic-VR	111
4.15	Ochs et al. [49], entraînement de docteurs à l'annonce de mauvaises nouvelles : salle immersive (CAVE)	112
4.16	Babu et al. [50], protocoles culturels indiens de communication : dispositif de Réalité Virtuelle	112
4.17	Cordar et al. [51], protocoles médicaux de communication en boucle fermée : dispositif de Réalité Mixte	113
4.18	Espace Interaction-Perception pour l'évaluation d'outils utilisant des personnages virtuels via les technologies immersives	115
4.19	Positionnement des travaux de la littérature sur l'espace d'évaluation Interaction-Perception	115
4.20	Devault et al. [36], négociation à tour de rôle : vue partielle de l'interface magicien d'Oz	117
4.21	Vallée de l'étrange (ou "uncanny valley") [52, 53]	117
4.22	Prototype Holodeck Safran, scène de familiarisation	121
4.23	Exemple de personnages virtuels réalisés avec Morph3D	121
4.24	Panneau de contrôle formateur	122
4.25	Scène du scénario des commerciaux : la négociation client	123
4.26	Scène du scénario des managers : la communication d'équipe	123
4.27	VIVE Tracker fixé à la table (à gauche) et VIVE Controller fixé à la chaise (à droite) .	124
4.28	Processus expérimental commerciaux	126
4.29	Expérimentations commerciaux : groupe de traitement (gauche) et groupe de contrôle (droite)	127
4.30	Processus expérimental managers	128
4.31	Expérimentations managers : groupe visiocasque (gauche) et groupe écran projeté (droite)	129
4.32	Vive Tracker à la ceinture d'un sujet manager du groupe projeté	130
4.33	Visiocasque HTC VIVE, équipé d'un serre-tête <i>Deluxe Audio Strap</i>	131
4.34	Scores d'utilisabilité (SUS)	132
4.35	Résultats des questionnaires de présence (IPQ) des commerciaux	133
4.36	Résultats des questionnaires de présence sociale (TPI) des commerciaux	134
4.37	Résultats des questions propres à l'interaction parasociale des commerciaux	134
4.38	Résultats des questionnaires de présence (IPQ) des managers	135
4.39	Résultats des questionnaires de présence sociale (TPI) des managers	136
4.40	Résultats des questions propres à l'interaction passive interpersonnelle des managers .	137
4.41	Résultats des questionnaires SSQ pour les commerciaux	140
4.42	Résultats des tests de Kolmogorov-Smirnov pour les résultats des questionnaires de cybermalaises (SSQ) des commerciaux	140
4.43	Résultats des questionnaires de cybermalaises (SSQ) pour les managers	141
4.44	Résultats des tests de Kolmogorov-Smirnov pour les résultats des questionnaires de cybermalaises (SSQ) des managers	141
4.45	Distribution des items du formulaire détaillé d'évaluation des commerciaux, en fonction des différents savoirs et habiletés	144
4.46	Distribution des items du questionnaire de ressenti des managers, en fonction des différents savoirs et habiletés	145
4.47	Exemple de nuage de points des positions centrées sur la moyenne, pour un sujet du groupe projeté	149
4.48	Exemple d'ellipse et de ses demi-axes	150
4.49	Exemple d'ellipses correspondant à des déplacements équilibrés (gauche) et irréguliers (droite)	151
4.50	Indice de direction δ , en fonction d'un déplacement frontal ou latéral	152
4.51	Variations des déplacements des managers dans l'espace (/0.5s)	152
4.52	Variations de déplacement et ellipses d'inertie des points pour chaque sujet	153

4.53	Résultats des ellipses d'inertie des variations de déplacement pour chaque groupe de sujets	154
4.54	Exemples d'ellipses aux points répartis de manière différente : diffuse (gauche) et groupées (droite)	155
4.55	Positionnement de l'Holodeck Safran par rapport aux travaux de la littérature, selon l'espace d'évaluation Interaction-Perception	160
5.1	À intensité maximale, configurations de Character Creator 3 pour les émotions joie, tristesse, colère et surprise	165
5.2	Ambiguïtés entres certaines configurations de Character Creator 3 pour les émotions joie et surprise	166
5.3	Exemple : positions des points du maillage du visage féminin de base de Character Creator 3, pour différentes valeurs du blendshape "Mouth Smile".	167
5.4	Méthode d'animation faciale par "squelettage" [54]	168
5.5	Capture des expressions faciales sur le film <i>Avatar</i> de Cameron [55]	169
5.6	Actions Units FACS [56] proposées pour les 5 émotions identifiées (joie, tristesse, colère, surprise, scepticisme) dans la littérature [57, 58, 59, 60, 61]	171
5.7	Démarche générale pour le dessin et l'évaluation d'expressions faciales émotionnelles	175
5.8	Prototype de dessin d'expressions faciales émotionnelles	177
5.9	Exemple de représentation graphique des dessins pour une Action Unit d'une expression donnée, sans prendre en compte l'imprécision (gauche) et en prenant en compte une imprécision δ (droite)	178
5.10	Expressions dessinées à partir de la perception majoritaire des sujets	181
5.11	Prototype de tri, étape de suppression des expressions trop neutres	183
5.12	Prototype de tri, étape du tri des expressions en fonction de leur intensité	184
5.13	Exemple de positions intermédiaires déséquilibrées, pourtant retenues comme optimales, lorsque la taille des segments n'est pas prise en compte ($i_1 = 3$, $i_2 = 4$, $i_3 = 5$, $i_4 = 14$).	188
5.14	Résultats obtenus pour la définition des niveaux d'intensité	189
5.15	Exemple de comparaison pour l'expression <i>En colère</i> , entre les niveaux dessinés et ceux établis grâce au prototype de tri	189
5.16	Pour <i>En colère</i> , différences des expressions jugées plus représentative selon le personnage	194
5.17	Dessins à intensités maximales, pour les différentes expressions évaluées	195
5.18	Exemple de courbes ROC	197
5.19	Courbe ROC des évaluations, toutes expressions confondues	198
5.20	Exemple de courbes SPC (<i>Spontanéité des Perceptions Correctes</i>)	198
5.21	Taux d'erreurs pour les différentes expressions évaluées	198
5.22	Dessins retenus pour l'expression <i>Content(e)</i>	199
5.23	Dessins retenus pour l'expression <i>Mécontent(e)</i>	200
5.24	Spontanéité des Perceptions Correctes (SPC) pour l'expression <i>En colère</i> du personnage Aitor	200
5.25	Dessins retenus pour l'expression <i>En colère</i>	201
5.26	Spontanéité des Perceptions Correctes (SPC) pour l'expression <i>Surpris(e)</i> du personnage Aitor	202
5.27	Dessins retenus pour l'expression <i>Surpris(e)</i>	202
5.28	Spontanéité des Perceptions Correctes (SPC) pour l'expression <i>Sceptique</i> du personnage Mari	203
5.29	Dessins retenus pour l'expression <i>Sceptique</i>	203

Liste des tableaux

2.1	Scores SUS, grades lettrés de Sauro [30] et évaluation adjectivales d'utilisabilité proposées par la communauté UIUXTrend	53
2.2	Exemples de variables qualitatives et quantitatives	59
2.3	Pour le choix d'un restaurant préféré, exemple d'un tableau de contingence, de ses fréquences et de ses effectifs théoriques	63
3.1	Résultats des items liés à l'évaluation du fusil et de la télécommande, dans le <i>Questionnaire utilisateur</i>	84
3.2	Résultats des tests statistiques (Wilcoxon-Mann-Whitney) pour les Questionnaires d'apprentissage	85
3.3	Résultats des tests statistiques pour la diminution du nombre d'erreurs commises, entre la première procédure (#1) et les itérations suivantes (∞)	87
3.4	Résultats des tests statistiques pour la comparaison du nombre d'erreurs commises entre les deux groupes	87
3.5	Résultats des tests statistiques (Student) pour les temps d'utilisation	89
3.6	Résultats des hypothèses	90
4.1	Résultats des questionnaires de présence sociale (TPI) et des tests statistiques (Wilcoxon-Mann-Whitney) pour les commerciaux	134
4.2	Résultats des questions propres à l'interaction parasociale et des tests statistiques (Wilcoxon-Mann-Whitney) pour les commerciaux	135
4.3	Réponses* des managers du groupe visiocasque, pour les symptômes de Désorientation du questionnaire de cybermalaises (SSQ)	142
4.4	Résultats des ellipses d'inertie des variation d'occupation de l'espace par les managers, et résultats des tests statistiques (test de Student)	152
5.1	Composition d'expressions faciales émotionnelles en Action Units FACS (2002) dans la littérature	172
5.2	Compositions issues de la littérature et proposées aux sujets pour la pré-sélection . . .	191
5.3	Scores de représentativité (S) obtenus pour la pré-sélection des expressions issues de la littérature	193
5.4	Scores de représentativité (S) obtenus pour la pré-sélection des expressions proposées par l'outil	193
5.5	Résultats des tests statistiques (Fisher) concernant les taux d'erreur obtenus pour l'expression <i>Content(e)</i>	199
5.6	Résultats des tests statistiques (Fisher) concernant les taux d'erreur obtenus pour l'expression <i>Mécontent(e)</i>	200
5.7	Résultats des tests statistiques (Fisher) concernant les taux d'erreur obtenus pour l'expression <i>En colère</i>	200

5.8	Résultats des tests statistiques (Fisher) concernant les taux d'erreur obtenus pour l'expression <i>Surpris(e)</i>	201
5.9	Résultats des tests statistiques (Fisher) concernant les taux d'erreur obtenus pour l'expression <i>Sceptique</i>	202

Liste des acronymes

AU : Action Unit

CC3 : Character Creator 3

CNRTL : Centre National de ressources Textuelles et Lexicales

EAO : Enseignement Assisté par Ordinateur

FACS : Facial Action Coding System

FÉLIN : Fantassin à Équipement et Liaisons INTégrés

IPQ : Igroup Presence Questionnaire

IR : InfraRouge

JDR : Jeu de Rôle

PMI : Point Moyen d'Impact

ROC : Receiver Operating Characteristic

SALSA : Simple Automated Lip Sync Approximation

SPC : Spontanéité des Perceptions Correctes

SSQ : Simulator Sickness Questionnaire

SUS : System Usability Scale

TLFi : Trésor de la Langue Française Informatisé

TPI : Temple Presence Inventory

VR : Virtual Reality (Réalité Virtuelle)

WIMP : Windows, Icons, Menus and Pointing device

I Réalité Virtuelle pour l'apprentissage

Les premiers usages de la Réalité Virtuelle pour l'apprentissage remontent au début des années 90 [62]. Au fil des années, une large communauté scientifique et industrielle s'y est intéressé. De nombreux travaux ont ainsi exploré des cas d'usage, étendant ses domaines d'application sur un large éventail de situations, allant de l'éducation scolaire aux formations professionnelles.

En plaçant l'activité de l'apprenant au cœur des environnements virtuels, les apports et les possibilités de la Réalité Virtuelle continuent encore d'être explorés aujourd'hui.

Parmi ces avantages on notera notamment la possibilité de simuler un environnement virtuel plus adapté que l'environnement réel, au sein duquel l'apprenant va pouvoir s'exercer en évitant les risques humains et matériels (e.g. formations de sécurité [63, 64], formations chirurgicales [65], formations au pilotage [66], etc.). Simuler un environnement virtuel permet également d'apprendre en s'affranchissant de contraintes de coût ou de difficultés d'accès au matériel [35].

La Réalité Virtuelle permet également de proposer un point de vue adapté et flexible à l'apprenant. En favorisant la visualisation de l'invisible (e.g. éléments habituellement masqués, détériorés, ou trop petits pour être observés), elle va apporter une vision plus accessible et compréhensible de l'information.

Elle introduit également la possibilité de réalisation d'activités corporelles et cognitives en lien avec le sujet d'apprentissage, afin d'assimiler des gestes complexes (e.g. apprentissage de gestes techniques [67]).

La formation en environnement virtuel apporte aussi la possibilité de différentes fonctionnalités pédagogiques telles que les formations collaboratives [68], ou encore l'utilisation de tuteurs intelligents [69].

Enfin, nous verrons que la Réalité Virtuelle permet la mesure, le suivi et l'analyse de l'activité de l'apprenant, afin d'apporter une vision objective sur ses prestations. Elle ouvre entre-autres des possibilités de rejeu dans l'environnement virtuel, favorisant une vision objective et une réflexion de l'apprenant sur ses erreurs et sur ses améliorations [62].

II Contexte des travaux

Si la Réalité Virtuelle et son utilisation pour l'apprentissage ont été étudiées depuis plusieurs décennies, les années 2016-2017 sont souvent identifiées dans les médias comme les "années" de la Réalité Virtuelle [70]. Cette période a été marquée par l'apparition de dispositifs à bas coûts et grand public. Cette démocratisation a amené un intérêt accru du domaine industriel.

Au cours de cette période, la société Capgemini a constaté les limites de la démocratisation de ces technologies auprès de ses clients. Ceux-ci ont rapportent des travaux sur des outils de formation en Réalité Virtuelle, ne passant que trop rarement le stade du prototype.

Surfant sur l'effervescence suscitée par l'apparition de ces nouveaux dispositifs, les initiatives peinaient en effet à concevoir des solutions utilisables et/ou proposant des fonctionnalités suffisamment innovantes et efficaces¹.

C'est dans ce contexte et pour répondre à cette problématique, que les travaux de thèse ont été initiés avec le Laboratoire d'Informatique de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM). Cette collaboration s'inscrit ainsi dans le cadre d'une thèse Cifre².

III Pertinence des environnements de formation en Réalité Virtuelle

L'objectif des travaux consistait donc à capitaliser sur le domaine scientifique, afin d'identifier et de définir des méthodologies de conception et d'expérimentation, permettant d'aboutir à des outils d'apprentissage correctement adaptés.

Dans le cadre de nos travaux, nous définissons ainsi la notion de pertinence à un environnement de formation en Réalité Virtuelle, à partir de sa définition dans le langage courant³.

Pertinent(e) :

Qui est exactement adapté à l'objet dont il s'agit.

Afin de qualifier la pertinence d'un environnement de formation en Réalité Virtuelle, nous proposons d'introduire deux déclinaisons. Chacune d'entre-elles vise à répondre à des problématiques précises :

— *Pertinence de conception* de l'outil en Réalité Virtuelle.

Nous parlons de "pertinence de conception" lorsque nous cherchons à nous assurer que les choix de conception de l'outil permettent d'atteindre une utilisation adaptée.

Nous essayons d'identifier le "comment" de la conception de l'outil, allant des concepts à exploiter aux dispositifs à utiliser. Nous cherchons aussi à explorer et à utiliser différentes méthodes permettant de s'assurer que toutes les précautions ont bien été prises afin de garantir une pertinence de conception.

Par l'utilisation du terme "pertinence de conception", nous cherchons donc à répondre à diverses questions, parmi lesquelles :

Comment assurer l'utilisation convenable de l'outil ?

Quelles interfaces utiliser ?

Quels concepts exploiter ?

De quelles limites faut-il se prémunir ?

Comment s'assurer que ces précautions sont prises et quelles méthodologies appliquer afin de vérifier que la conception est adaptée ?

— *Pertinence pédagogique* de l'outil de formation en Réalité Virtuelle.

Indépendamment d'un outil correctement conçu, l'intérêt de sa conception réside dans ses apports pédagogiques. Il y a peu de légitimité à élaborer un outil en Réalité Virtuelle, s'il n'apporte aucun bénéfice supplémentaire à l'apprenant et/ou au formateur.

Nous parlons donc de "pertinence de l'outil de formation" lorsque nous souhaitons nous assurer que la solution apporte une plus-value de formation. Nous cherchons ainsi à identifier, concevoir et/ou utiliser des méthodes permettant d'évaluer l'apprenant en Réalité Virtuelle.

1. Efficient(e) : qui produit l'effet spécifique attendu

2. Cifre (Conventions Industrielles de Formation par la REcherche) : Dispositif subventionnant toute entreprise de droit français qui embauche un doctorant, pour le placer au cœur d'une collaboration de recherche avec un laboratoire public.

3. Source : Trésor de la Langue Française Informatisé (TLFi) du Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL), <http://www.cnrtl.fr/definition/>

Nous essayons aussi d'établir quelles méthodologies doivent être appliquées afin d'analyser si un apport est observable.

Lorsque nous parlons de "pertinence pédagogique", nous cherchons donc à explorer à différentes questions, comme par exemple :

Comment vérifie-t-on que la solution apporte une plus-value de formation ?

Comment évalue-t-on l'apprenant ?

Quelles méthodologies doit-on appliquer pour confirmer un apport observé ?

Enfin, une des principales discussions pouvant être menée sur les travaux du domaine, concerne l'utilisation des outils statistiques. Celle-ci est en effet parfois inexistante, d'autre fois menée en dépit des usages et des contraintes du domaine statistique.

Dans le cadre des travaux, nous nous sommes appuyés sur ce domaine afin de garantir la cohérence et la fiabilité de nos observations, en proposant un utilisation adaptée de tests statistiques.

IV Contributions

À travers l'exploration de plusieurs cas d'usage de formation, les travaux ont donné lieu à diverses contributions présentées dans ce document.

Notre première contribution consiste à explorer les nuances des différents domaines, afin de proposer une *représentation du cadre terminologique propre à la formation*. En plaçant la notion de compétence au cœur de la représentation, elle se structure autour de différentes notions fondamentales telles que savoir, savoir-faire, savoir-être, connaissance et habileté.

Nous avons ensuite exploré l'utilisation de la Réalité Virtuelle sur plusieurs cas d'usage, puis analysé la pertinence des solutions conçues au cours d'expérimentations. Afin d'en exploiter les résultats, nous avons cherché à nous appuyer sur les tendances actuelles de l'utilisation des outils statistiques au sein des communautés de chercheurs en Réalité Virtuelle.

Nous avons repris et étendu une *méthodologie statistique pour la comparaison de données quantitatives et qualitatives ordinales*. Cette contribution nous a permis de valider ou de nuancer la significativité de nos observations, en fonction de l'échantillon et du type de variables analysées.

Parmi les cas d'usage explorés, le premier que nous rapportons concerne la formation à la calibration de matériel militaire. À cette occasion, nous proposons un *prototype d'outil de formation aux réglages de la lunette infrarouge* du fantassin de l'Armée de Terre.

S'inspirant du logiciel de formation existant, cette contribution vise à répondre à certaines problématiques actuellement observées lors des processus de formation, via l'utilisation de la Réalité Virtuelle.

L'autre cas d'usage traité dans ce document concerne la formation aux compétences sociales. Les travaux autour de celui-ci donnent lieu à de nombreuses contributions.

En explorant les terminologies inter-domaines, nous proposons tout d'abord une *représentation des compétences sociales*, en reprenant celle que nous avons proposé pour la formation. Elle étend la précédente représentation en introduisant notamment les notions d'habiletés réceptives, décisionnelles et émettrices.

Nous proposons ensuite un *prototype d'outil de formation aux compétences sociales*.

Cette contribution est destinée à explorer des réponses aux problématiques des formations actuelles, prenant la forme de jeux de rôle présentiels. Le prototype a été implémenté sur des scénarios à destination de populations de managers et commerciaux. Il a ensuite été expérimenté sur ces populations afin d'en analyser la pertinence. Ces expérimentations ont permis de proposer plusieurs contributions.

Nous proposons notamment une *méthodologie statistique pour l'analyse des cybermalaises*. Celle-ci se base sur les résultats d'un questionnaire issu de la littérature (SSQ) et s'appuient sur un échantillon de référence fourni par ses auteurs. Cette contribution propose d'analyser si une anomalie statistique est présente dans les résultats des symptômes de cybermalaises ressentis par les sujets.

Nous proposons également des *questionnaires d'évaluation* à destination des commerciaux et managers. Ces contributions ont été élaborées en collaboration avec des formateurs métier. Afin de traiter les résultats de ces questionnaires, nous proposons une *méthodologie statistique pour traiter des données qualitatives issues de plusieurs évaluateurs*.

Nous proposons aussi un autre *questionnaire pour évaluer la confiance en soi*. Cette contribution a aussi été conçue avec des formateurs métier, en s'inspirant de travaux de la littérature.

Enfin, nous proposons une *méthodologie permettant d'analyser l'occupation de l'espace* des apprenants en Réalité Virtuelle. Ce comportement fait partie des différences attitudes à évaluer.

Suite aux travaux sur la formation aux compétences sociales, nous avons constaté que les expressions faciales émotionnelles des personnages virtuels étaient peu réalistes et ambiguës. Nous avons alors cherché à utiliser la Réalité Virtuelle afin de dessiner des expressions faciales émotionnelles pertinentes. Cette démarche a amené plusieurs contributions.

La première, d'ordre général, réside en la proposition d'une *méthode utilisant la perception des sujets en Réalité Virtuelle, afin de concevoir des expressions faciales émotionnelles représentatives*.

Cette contribution propose de dessiner les expressions, d'en établir les niveaux d'intensité et d'évaluer leur pertinence en mettant les sujets dans diverses situations en Réalité Virtuelle.

Nous proposons tout d'abord un *prototype de dessin d'expressions* en Réalité Virtuelle, ainsi qu'une *méthodologie permettant de concevoir une expression à partir de la perception majoritaire des sujets*. Nous proposons ensuite un *prototype de tri d'expressions* en Réalité Virtuelle, notamment destiné à établir les différents niveaux d'intensité en fonction des degrés de perception des sujets. Cette contribution s'accompagne là encore d'une *méthodologie permettant de définir les niveaux d'intensité à partir de la perception majoritaire des sujets*.

Enfin, nous proposons un *prototype d'évaluation d'expressions* en Réalité Virtuelle, afin de mesurer la pertinence de conception de différentes expressions faciales émotionnelles. Une *méthodologie d'évaluation de la pertinence des expressions* accompagne là aussi cette contribution. Elle consiste à mesurer la représentativité des expressions selon deux critères : sa correction et sa spontanéité de perception.

Toutes ces contributions visent à proposer des solutions destinées à analyser la pertinence de conception et la pertinence pédagogique des différents prototypes d'outils de formation proposés pour les cas d'usage explorés.

V Organisation du document

Ces différentes contributions viennent structurer le document de la manière suivante.

Dans le Chapitre 2, nous commençons par définir les cadres terminologiques, propres à la formation et à la Réalité Virtuelle.

Nous présentons ensuite les différents concepts fondamentaux, les dispositifs matériels et les limites à prendre en compte afin d'atteindre l'objectif de pertinence de conception. Nous identifions également différents outils et méthodes à notre disposition, nous permettant d'analyser la pertinence de conception et la pertinence pédagogique de l'outil de formation.

Enfin, nous présentons aussi les tests et la méthodologie statistique que nous proposons d'utiliser afin de vérifier statistiquement nos résultats.

Nous étudions ensuite notre premier cas d'usage dans le Chapitre 3.

Nous nous intéressons à la formation aux savoir-faire procéduraux, via le cas d'usage de formation aux réglages de la lunette infrarouge du fantassin de l'Armée de Terre.

Nous présentons le prototype proposé et les expérimentations produites afin d'en évaluer la pertinence.

Dans le Chapitre 4, nous poursuivons en explorant notre autre cas d'usage : la formation aux compétences sociales.

Nous y présentons les différentes contributions et le prototype proposé. Nous rapportons les différentes expérimentations conduites de sorte à analyser sa pertinence, ainsi que les contributions produites pour y parvenir.

Dans le Chapitre 5 nous explorons enfin l'utilisation de la Réalité Virtuelle pour atteindre une conception pertinente d'expressions faciales émotionnelles.

Nous présentons la méthodologie proposée et les différents prototypes utilisés.

Enfin, nous terminons ce document en apportant les conclusions et les perspectives de ces travaux.

Dans ce chapitre, nous introduisons les différentes notions et outils que nous utilisons pour étudier la pertinence d'outils de formation en Réalité Virtuelle.

Nous commençons tout d'abord par définir un cadre terminologique propre à la formation. Connaissance, compétence, aptitude, capacité, habileté... La définition et l'utilisation des différents termes n'est pas chose aisée. Nous cherchons à nous positionner en identifiant le cadre terminologique utilisé dans le cadre des travaux.

Nous en faisons de même pour la définition de la Réalité Virtuelle, en nous attardant sur les autres technologies immersives qui y sont souvent associées.

Nous nous intéressons ensuite aux différentes interfaces, aux concepts fondamentaux et aux limites à prendre en compte afin de garantir la pertinence de conception d'un outil de formation en Réalité Virtuelle.

Enfin, nous introduisons certains outils pouvant être utilisés, afin d'analyser si cet objectif de pertinence est atteint. Nous présentons notamment la méthodologie statistique proposée et utilisée dans le cadre de nos travaux.

I Terminologie propre à la formation

Dans cette première section, nous présentons donc le cadre terminologique propre à la formation, utilisé dans ce document. Cet ensemble de termes et sa représentation serviront de base pour structurer par la suite les contenus et les analyses produits dans ce document.

Établir une terminologie sur le sujet n'est pas évident, tant il se positionne à la croisée de plusieurs domaines scientifiques, entre lesquels les approches varient. Au sein même de ces domaines, les notions propres à la formation tendent aussi à varier en fonction des courants de pensée.

Nous fixons notre cadre terminologique en essayant de couvrir, tant que faire se peut, des approches variées.

Nous n'occultons pas néanmoins l'existence d'autres approches fondamentales que nous n'abordons pas, mais pouvant ouvrir la discussion sur ce cadre terminologique.

1. Formation et formation professionnelle

Selon Fabre [71], l'apparition du mot français "formation" remonte au XI^{ème} siècle, et désigne ainsi le "*processus naturel ou culturel par lequel les choses prennent formes, ainsi que les résultats de ce processus*". La signification pédagogique du terme ne serait apparue, selon lui, qu'au début du XX^{ème} siècle.

D'un point de vue pédagogique, le terme "*formation*" fait aujourd'hui fortement référence au "*fait de développer les qualités, les facultés d'une personne, sur le plan physique, moral, intellectuel ou de lui faire acquérir un savoir dans un domaine particulier*"¹.

1. TLFi du CNRTL, <http://www.cnrtl.fr/definition/>

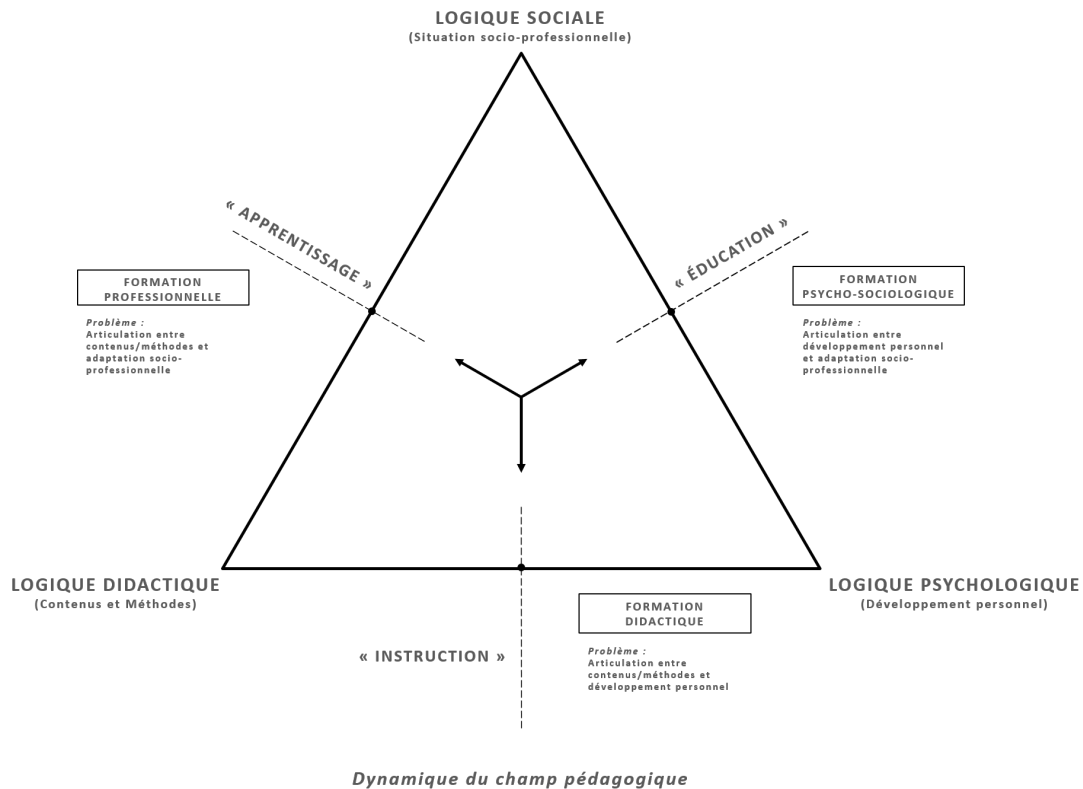


FIGURE 2.1: "Triangle de la formation" de Fabre [1]

S'appuyant sur les travaux de Dewey en philosophie de l'éducation [72], Fabre identifie trois logiques pédagogiques dominantes lors d'une démarche de formation [1] :

- la *logique sociale*, visant à préparer une personne à un métier (situation socio-professionnelle) : "*former pour quelque chose*";
- la *logique didactique*, cherchant à construire le savoir d'une personne (contenus et méthodes) : "*former à quelque chose*";
- la *logique psychologique*, ciblant le développement personnel d'une personne : "*former quelqu'un*".

Il catégorise les formations selon trois types, chacun d'entre eux s'articulant autour de deux logiques (Figure 2.1), une principale et une dominante, la troisième restant marginale. On retrouve ainsi sur ce triangle :

- les *formations psycho-sociologiques*, conciliant développement personnel et adaptation socio-culturelle : dynamique d'"*éducation*".
- les *formations didactiques*, conjoignant acquisition de savoirs et développement personnel : dynamique d'"*instruction*".
- les *formations professionnelles*, articulant logique sociale et logique didactique : dynamique d'"*apprentissage*".

Nos travaux s'articulant autour de formations professionnelles, nous utilisons le terme de "formation" pour parler de celles-ci dans ce document.

Nous proposons d'utiliser la définition suivante.

Formation (professionnelle) :
Démarche consistant à l'apprentissage d'éléments nécessaires à l'exercice d'un métier, i.e. l'utilisation de contenus et de méthodes en vue d'occuper une situation socio-professionnelle.

2. Apprentissage et apprenant

L'utilisation du terme "apprentissage" peut revêtir diverses significations et subtilités en fonction des domaines, des courants de pensée et des contextes dans lesquels il est utilisé.

Dans le langage courant, il fait référence à *une initiation, par l'expérience, aux divers aspects de la vie humaine*², (e.g. "l'apprentissage de [la vie, l'adversité, etc.]").

En psychologie, il peut centrer sa signification sur la notion d'expérience, revêtant ainsi le sens d'une "modification adaptative du comportement au cours d'épreuves répétées" (H. Piéron [73]).

Enfin, dans son "triangle de la formation" (Figure 2.1), Fabre [71] utilise le terme "apprentissage" selon sa signification dans les domaines de l'enseignement ("l'action d'apprendre un métier") et de la formation ("formations professionnelles organisées permettant d'acquérir une qualification pour un métier").

Dans ce contexte, le terme d'apprentissage s'applique donc à deux éléments essentiellement nécessaires à la qualification d'une personne pour un métier : les connaissances et les compétences. Ces deux termes étant particulièrement discutés inter- et intra-domaines, nous essayons d'esquisser leurs définitions respectives dans la sous-section suivante.

Dans le cadre de nos travaux, nous cherchons à nous approcher de ces différentes significations du terme "apprentissage". Nous proposons la définition suivante.

Apprentissage :

Ensemble de mécanismes menant, chez une personne, à l'acquisition de connaissances et/ou au développement de compétences.

Par extension, nous proposons d'utiliser le terme "apprenant" pour désigner ces personnes.

Apprenant :

Toute personne amenée à vivre une situation d'apprentissage.

3. Contexte et connaissance

Dans le langage courant, on attribue de nombreux sens au terme "connaissance".

Ses usages dans le vocabulaire scientifique étendent ses significations philosophiques. Dans ce domaine, la connaissance est notamment vue comme un "un acte de la pensée qui saisit un objet par les sens ou non, avec implication plus ou moins grande du sujet de la connaissance"³. Ainsi, la connaissance peut s'apparenter à la faculté d'une personne à avoir conscience d'une information, provenant tant du monde qui l'entoure (e.g. connaissance des lois physiques, connaissance d'une ville), que d'elle-même (e.g. connaissance de soi, néologisme usuel "perte de connaissance").

En fonction des différents domaines scientifiques et des courants de pensée les composant, les définitions peinent à trouver un consensus.

En informatique, Bottecchia [2] souligne la définition proposée par Merlo [74], qui s'articule autour de celle d'un contexte pour l'information. Il voit ainsi :

- le *contexte* d'une information comme "une série d'informations permettant à son utilisateur d'en comprendre la signification, en vue de satisfaire des objectifs qui lui sont assignés" ;
- une connaissance comme la "formalisation d'un ensemble d'informations la caractérisant, ainsi que d'informations décrivant le contexte dans lequel elle a été générée et/ou se destine à être exploitée".

À partir de ces définitions, nous proposons de définir une connaissance comme suit.

2. TLFi du CNRTL : <http://www.cnrtl.fr/definition/>

3. TLFi du CNRTL : <http://www.cnrtl.fr/definition/>

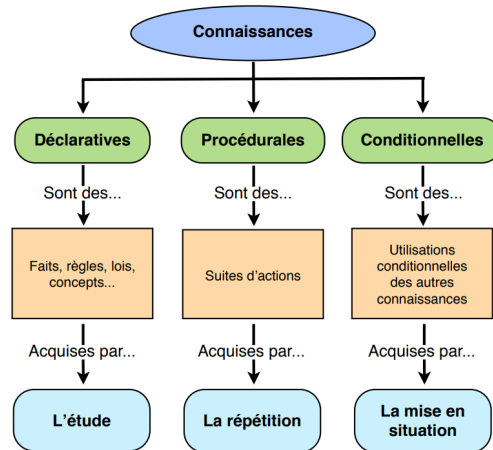


FIGURE 2.2: Représentation de la typologie des connaissances en sciences cognitives par Bottecchia [2]

Connaissance :

Ensemble d'informations potentiellement contextualisées et à disposition d'une personne, afin de lui permettre d'atteindre des objectifs nécessitant une conscience plus ou moins grande du sujet de la connaissance.

Les connaissances constituent ainsi les éléments substantiels sur lesquels agissent les processus cognitifs de l'apprenant.

D'un point de vue typologique, tout comme Bottecchia, nous proposons de nous référer aux sciences cognitives. En relayant les travaux de Tardif [75] et d'Anderson [76], il souligne que trois types de connaissances ont été identifiés (Figure 2.2) :

- Les connaissances déclaratives.

Connaissances déclaratives (Bottecchia [2]) :

Type de connaissances regroupant les principes, les concepts fondamentaux, les règles, etc.

Elles sont "statiques", i.e. elles nécessitent une transformation en procédures ou en conditions par l'apprenant, afin qu'il puisse les utiliser.

Parmi ces connaissances, on retrouve par exemple les définitions, les lois, les théories, les descriptions d'objets, etc.

- Les connaissances procédurales.

Connaissances procédurales (Bottecchia [2]) :

Connaissance des étapes et des moyens de réalisation d'une action.

Elles sont "dynamiques", elles demandent des mises en pratique répétées afin d'être assimilées.

On peut citer en exemple la connaissance de procédures spécifiques à une opération de maintenance, de méthodologies expérimentales, de gestes (e.g. gestes opératoires du chirurgien) ou encore de protocoles socio-culturels de communication (e.g. salutation dans une culture donnée).

- Les connaissances conditionnelles.

Connaissances conditionnelles (Bottecchia [2]) :

Connaissances consistant à établir les conditions causales et temporelles d'une action.

Elles consistent à établir des classifications et des catégorisations pour être utilisées consciemment dans des contextes différents.

Ces connaissances sont là aussi "dynamiques", elles évoluent au travers de contextes et de synchronisations expérimentés au cours de mises en situation, durant lesquelles l'apprenant a le choix des procédures à adopter.

Selon Tardif [75], ces connaissances sont responsables du transfert des apprentissages et leur développement chez l'apprenant contribue à lui apporter une expertise.

Parmi les connaissances conditionnelles, on retrouve par exemple la connaissance de critères permettant de choisir une procédure à appliquer pour résoudre un problème complexe (e.g. sélection de méthodes mathématiques données pour résoudre un problème), la connaissance des cas d'application d'une règle (e.g. en droit, reconnaissance d'une situation s'appliquant au code civil), ou encore la connaissance d'indices permettant d'adapter un comportement à un interlocuteur (e.g. caractérisation des manifestations verbales et non verbales d'un état émotionnel chez un interlocuteur).

Cette typologie en trois catégories nous permet donc d'identifier les différents types de connaissances, tant en fonction de ce qui les caractérise, que par leurs moyens d'acquisition.

4. Aptitude, capacité et habileté

4.1. Aptitude

La connaissance est un élément central de la démarche d'apprentissage. Elle représente un potentiel et/ou un prérequis nécessaire à l'acquisition de toute aptitude par un apprenant.

Dans le langage courant, l'"aptitude" fait référence aux "*qualités [d'une personne] rendant possible certaines performances*"⁴.

Nous proposons la définition suivante pour une aptitude.

Aptitude :

Prédisposition (innée ou acquise) d'une personne à produire un ensemble de comportements nécessaires à l'accomplissement d'une tâche, d'un acte ou d'un travail donné.

Par extension, deux notions viennent compléter l'aptitude lorsqu'on parle d'apprentissage : la capacité et l'habileté.

Dans le domaine pédagogique, Roegiers [77] souligne la proximité de ces trois termes. S'ils peuvent sembler sémantiquement proches, ils n'en comportent pas moins des nuances notables.

4.2. Capacité

Dans le langage courant, le terme "capacité" indique une "*aptitude à faire quelque-chose*" dans le langage courant⁵.

En pédagogie, Meirieu [78] définit une capacité comme une "*activité intellectuelle stabilisée et reproductible dans des champs divers de la connaissance*".

Dans le même domaine, Raynal et Rieunier [79] voient la capacité comme une sorte d'aptitude transversale décontextualisée, i.e. "*susceptible d'être mis en œuvre dans des situations professionnelles ou sociales très différentes*". Ils énoncent également que "*la notion de capacité est généralement constitutive de la compétence*".

Ainsi, nous proposons la définition suivante d'une capacité.

4. TLFi du CNRTL : <http://www.cnrtl.fr/definition/>

5. TLFi du CNRTL : <http://www.cnrtl.fr/definition/>

Capacité :

Aptitude stable et transversale, représentant un potentiel de réussite et de mise en œuvre de compétences pour l'accomplissement d'une activité.

Raynal et Rieunier soulignent que le développement d'une capacité s'effectue par la prise de conscience de constantes comportementales pour l'accomplissement d'objectifs dans des situations similaires. Pour un apprenant, le niveau de transversalité d'une capacité dépendrait du nombre de situations contextualisées qu'il va rencontrer au cours de sa formation.

Roegiers [77] abonde dans le même sens en énonçant que "*la meilleure façon de développer une capacité est d'apprendre à l'exercer sur des contenus les plus différents les uns des autres, et en particulier dans différentes disciplines*". Il cite en exemple le développement de la capacité de synthèse chez l'élève, appelée à être mobilisée lors de différent cours : français, histoire, mathématiques, sciences, etc.

4.2.1. Habileté

Dans le langage courant, l'habileté se rapporte à une "*qualité (innée ou acquise) de finesse, d'adresse dans le choix des moyens pour arriver à une fin*"⁴.

Pour la formation, la finalité réside dans l'accomplissement d'une tâche, d'un acte, ou d'un travail. À l'instar de Delignières [80], il est possible de voir l'habileté comme une "*capacité à produire une réponse efficiente pour une tâche donnée*".

Nous proposons de retenir la définition suivante.

Habileté :

Capacité à produire, pour une tâche spécifique, une réponse qualitative nécessitant un certain niveau de finesse ou d'adresse.

On va avoir tendance à utiliser le terme d'habileté lorsqu'on parle d'une aptitude caractérisée par un certain niveau de spécificité contextuelle et/ou de virtuosité. On peut par exemple différencier capacité créative et habileté au dessin.

Par son niveau de spécificité et de virtuosité, l'acquisition d'une habileté suppose ainsi l'assimilation de la tâche par l'accumulation d'expérience dans sa réalisation.

5. Compétence, savoir, savoir-faire et savoir-être

Tel qu'abordé précédemment, la compétence est, avec la connaissance, l'autre élément central de la démarche d'apprentissage. Nous venons également de voir que la compétence trouve sa substance dans les capacités de l'apprenant.

Néanmoins, la compétence est un concept assez délicat à définir [80, 81]. Ses définitions, nombreuses et variées, diffèrent selon les disciplines et présentent même des approches contrastées au sein de celles-ci.

Alors qu'en psychologie elle va avoir tendance à définir globalement une capacité ou une habileté, en sciences de l'éducation elle va plutôt être vue comme un ensemble de savoirs mettant en jeu des capacités dans un contexte spécifique, pour une activité complexe.

Raynal et Rieunier [79] voient la compétence comme un "*ensemble des comportements potentiels (affectifs, cognitifs et psychomoteurs) permettant d'exercer efficacement une activité considérée généralement comme complexe*".

Pour Wittorski [82], la compétence implique la "*mobilisation dans l'action d'un certain nombre de savoirs combinés de façon spécifique en fonction du cadre de perception que se construit l'auteur de la situation*".

Comme le soulignent plusieurs auteurs [79, 83, 84, 85], la compétence s'articule en liant intimement des savoirs formalisés (savoir) et des savoir agissants (savoir-faire et savoir-être) :

— Le savoir.

Le verbe "savoir" peut signifier "*avoir présent à l'esprit un ensemble de connaissances rationnelles (concepts, idées, notions, images, représentations, affects), acquises par l'étude et la réflexion, et constituant une synthèse ordonnée sur un objet de connaissances*"⁶.

L'utilisation du nom commun trouve la référence suivante⁷, à laquelle nous proposons de nous référer pour définir un savoir.

Savoir :

Ensemble des connaissances acquises par l'étude, par l'observation, par l'apprentissage et/ou par l'expérience.

Le savoir peut ainsi faire référence aux connaissances déclaratives, s'acquérant par l'étude, l'observation, l'apprentissage ou l'expérience.

— Le savoir-faire.

Il peut être défini comme la "*pratique aisée d'un art, d'une discipline, d'une profession, d'une activité suivie*", ou encore comme une "*habileté manuelle et/ou intellectuelle acquise par l'expérience, l'apprentissage, dans un domaine déterminé*"⁷.

La notion de savoir-faire tend donc à étendre la définition du savoir, en se rapprochant de celle de l'habileté.

Comme le souligne Bottecchia [2], le savoir-faire peut correspondre aux connaissances procédurales. Cependant, la seule connaissance des procédures ne suffit pas à constituer un savoir-faire. Il nécessite l'acquisition d'aptitudes, reposant sur ces connaissances procédurales.

Par exemple, bien que le charpentier connaisse les étapes et les procédés nécessaires pour construire son toit, il développe son savoir-faire en s'entraînant afin d'acquérir les aptitudes nécessaires afin de réussir à le faire (e.g. préparation du matériel, agilité, précision du geste, etc.).

Un savoir-faire est donc forcément acquis soit par l'étude, soit par l'expérience.

De ce fait, nous proposons la définition suivante.

Savoir-faire :

Ensemble de connaissances procédurales et d'aptitudes manuelles et/ou intellectuelles, acquises par l'étude et/ou l'expérience, de sorte à être utilisables afin de produire une tâche spécifique.

Parmi les autres exemples de savoir-faire, on peut retrouver le dessin d'un plan pour le dessinateur industriel, la prise de rendez-vous client pour le commercial, ou encore le démontage d'une pièce pour le technicien de maintenance.

— Le savoir-être.

Selon Le Boterf [86], le savoir-être renvoie à des caractéristiques de comportement, à des traits de personnalité. Parmi les exemples que l'auteur cite, on retrouve des savoir-être liés au relationnel (e.g. empathie, conciliation, résolution de conflits etc.), à l'adaptation (e.g. diplomatie, pragmatisme, sens des priorités etc.), au dynamisme (e.g. méthodisme, persévérance, etc.), à l'intellectuel (e.g. capacité d'analyse, créativité, souplesse d'esprit, etc.), à l'autonomie et/ou à l'autorité (e.g. autonomie, charisme, discipline, etc.), ou encore à l'humeur et/ou à la sensibilité (e.g. sens critique, intuition, calme, etc.).

Nous proposons ainsi la définition suivante du savoir-être.

Savoir-être :

Capacités d'une personne à produire des actions et des réactions adaptées à une situation, un contexte, un environnement.

6. Source : TLFi du CNRTL : <http://www.cnrtl.fr/definition/>

7. Source : TLFi du CNRTL : <http://www.cnrtl.fr/definition/>

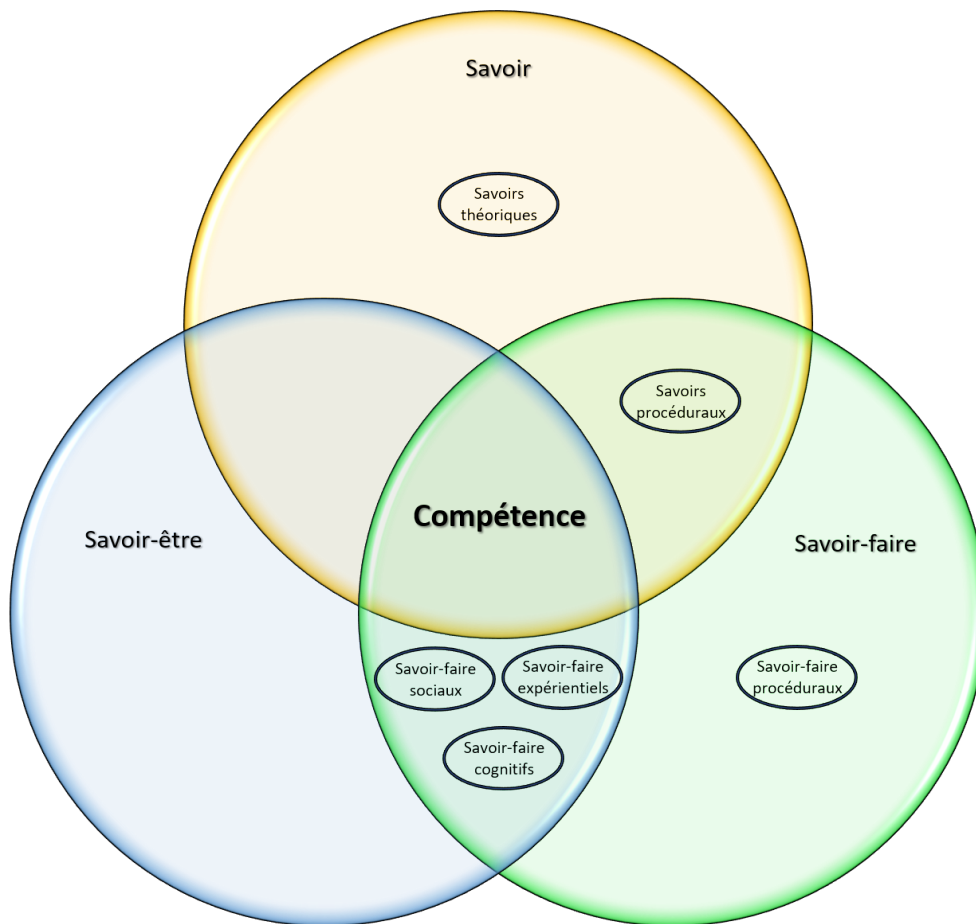


FIGURE 2.3: Les savoirs constitutif de la compétence

Ces actions produites sont conditionnées à un ensemble d'information contextuelles issues de la perception de la personne. Elle va faire appel à des connaissances conditionnelles et des habiletés intellectuelles, afin d'atteindre un comportement potentiellement optimal.

Le savoir-être s'acquiert, de ce fait, par l'acquisition de connaissances comportementales spécifiques à des situation.

À partir de ces terminologies, nous proposons la définition suivante pour la compétence.

Compétence :

Mobilisation articulée de ces différents savoirs, mettant eux-mêmes à profit des capacités, par le biais de comportements (affectifs, cognitifs et psychomoteurs) permettant d'exercer efficacement une activité dans un contexte donné.

Le Boterf [86, 87] identifie 6 principaux éléments constitutifs d'une compétence, via différents savoirs et savoir-faire. Nous proposons de voir chacun de ces savoirs comme sous-jacents aux savoirs (Figure 2.3) :

— les *savoirs théoriques*.

Savoirs théoriques (Le Boterf [86, 87]) :

Savoirs nécessaires à la compréhension, à l'interprétation.

Mettant ainsi en jeu des connaissances déclaratives, les savoirs théoriques peuvent s'apparenter au savoir.

— les *savoirs procéduraux*.

Savoir procéduraux (Le Boterf [86, 87]) :

Méthodes et procédures destinées à l'accomplissement d'une tâche.

Permettant de savoir comment faire, il s'agit de connaissances procédurales. Ils peuvent être vus comme une composante du savoir-faire.

— les *savoir-faire procéduraux*.

Savoir-faire procéduraux (Le Boterf [86, 87]) :

Comportements utilisables afin de mettre en application des savoirs procéduraux.

Ils impliquent un savoir pour procéder, i.e. le fait de savoir réaliser une tâche ou un acte précis. Ils peuvent également être vus comme composant le savoir-faire.

— les *savoir-faire expérimentiels*.

Savoir-faire expérimentiels (Le Boterf [86, 87]) :

Astuces et tours de main, acquis et restitués afin réaliser avec qualité une tâche.

Correspondant à du "savoir y faire", ils sont une conséquence directe de l'expérience. Les savoir-faire expérimentiels incluent donc fortement la notion d'habileté, ils peuvent donc être vus comme une composante du savoir-faire.

Ils sont grandement conditionnés au contexte de la tâche. Le "savoir y faire", implique la prise en considération des conditions liées au contexte de la tâche, afin de pouvoir l'effectuer avec qualité.

L'apprenant utilise ses connaissances conditionnelles acquise par l'expérience pour faire "dévier" son savoir-faire procédural vers le savoir-faire expérimentiel.

Par exemple, un technicien de maintenance expérimenté déviara de sa procédure initiale de recherche de panne sur un moteur. Il recentrera sa recherche en fonction des informations contextuelles dont il dispose (type de moteur, vétusté, contexte d'utilisation, etc.), ainsi qu'en fonction de son expérience sur le moteur (pannes récurrentes, symptômes précédemment constatés, etc.).

Les savoir-faire expérimentiel peuvent ainsi être vu comme un savoir commun au savoir-faire et au savoir-être.

— les *savoir-faire sociaux*.

Savoir-faire sociaux (Le Boterf [86, 87]) :

Savoir-faire permettant d'appliquer des comportements afin de communiquer, se comporter, se conduire de manière adaptée avec autrui.

Ils correspondent au fait de savoir appliquer des comportements à des situation sociales. Ces comportements peuvent consister en l'application de procédures sociales apprises (procédures de politesse, manière de structurer une communication, etc.).

Ils sont fortement conditionnés à la situation, au contexte, aux interlocuteurs.

Ils impliquent l'utilisation de connaissances conditionnelles, relatives au savoir-être en situation sociale.

Les savoir-faire sociaux peuvent donc être considérés à la fois comme un savoir-faire à vocation sociale, et à la fois comme un aspect inter-personnel du savoir-être.

Ils s'acquièrent tout au long de la vie, que ce soit par l'éducation familiale, la scolarité, la vie associative, la pratique d'une activité, les voyages, etc.

— les *savoir-faire cognitifs*.

Savoir-faire cognitifs (Le Boterf [86, 87]) :

Savoir-faire relevant d'opérations intellectuelles intériorisées.

Les opérations intellectuelles sollicitées peuvent tant consister à traiter l'information, qu'à savoir apprendre, qu'à raisonner, induire, déduire et définir.

Les savoir-faire cognitifs permettent de créer des informations nouvelles à partir d'informations existantes.

Ils renvoient à des caractéristiques comportementales tout en impliquent un certain degré d'habileté intellectuelle. De ce fait, le savoir-faire cognitif peut être vu tant comme un savoir-faire, que comme une dimension personnelle du savoir-être.

Comme le soulignent plusieurs auteurs [88, 89], la compétence est abstraite et hypothétique. Elles n'est ni visible, ni mesurable.

Cependant, elle se traduit par un comportement effectif. On peut en observer ses manifestations : les habiletés observables (e.g. précision du geste, finesse de raisonnement, etc.), ainsi que les résultats obtenus (e.g. qualité du résultat obtenu, efficacité, etc.).

Pour exemple, Darvogne et Noyé [90] rappellent que "*c'est au mur terminé que l'on voit la compétence du maçon*". Il est possible de reprendre cet exemple en ajoutant qu'on voit la compétence du maçon à dresser un mur, via sa capacité et son habileté à la tâche, se manifestant tant par le mur terminé, la qualité de ses finitions, que par le temps qu'il a mis à le réaliser.

La compétence n'est de ce fait pas évaluable, mais peut uniquement être inférée à partir de ses manifestations (e.g. habiletés observables, résultat produit, etc.) dans une situation ou un contexte donné.

Pour la formation, cette "virtualité" de la compétence et son articulation autour des différents savoirs, amène l'utilisation d'expressions qu'il convient de clarifier et distinguer. Nous choisissons ainsi de différencier :

— Montée en compétence(s) (ou développement de compétence(s)).

Montée en (ou développement de) compétence(s) :

Accompagnement de l'apprenant dans son acquisition de savoirs par l'étude et le développement de savoir-faire par des mises en pratique répétitives, ainsi que de savoir-être via des mises en situation spécifiques.

— Maintien de compétence(s).

Maintien de compétence(s) :

Rafraîchissement et consolidation de savoirs par le rappel des concepts fondamentaux, de savoir-faire via des mises en pratique répétitives, et de savoir-être par le biais de mises en situation diversifiées.

Roegiers [77] souligne que les capacités sont transformables : elles se combinent entre elles de sorte à générer d'autres capacités. Les compétences trouvant leur substance dans les capacités, elles héritent également de cette caractéristique.

Raynal et Rieunier [79] soulignent que l'ingénierie pédagogique tend à adopter une structuration imbriquée des compétences lorsqu'il s'agit de formation professionnelle.

Une compétence globale décrit ainsi les objectifs généraux de la formation, puis est elle-même divisée en sous-compétences constituant des objectifs intermédiaires. Ces sous-compétences peuvent être décomposés en micro-compétences, visant à remplir des objectifs spécifiques.

Sous-compétences (Raynal et Rieunier [79]) :

Compétences constituant les objectifs intermédiaires d'une compétence globale, décrivant les objectifs généraux d'une formation.

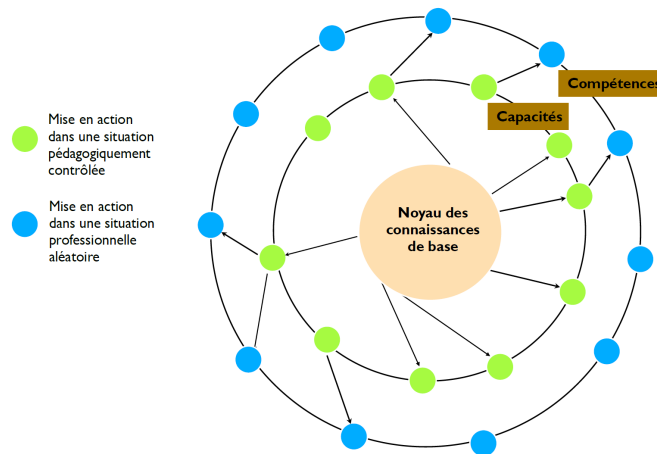


FIGURE 2.4: Représentation de la compétence sous forme "atomique" selon Jedliczka [3], rapporté par Bottecchia [2]

Micro-compétences (Raynal et Rieunier [79]) :
Compétences constituant les objectifs spécifiques d'une sous-compétence.

Si nous prenons l'exemple d'une infirmière, sa compétence va être composée de diverses sous-compétences, parmi lesquelles on trouve la gestion du relationnel avec le patient. Cette sous-compétence est elle-même être constituée de micro-compétences, comme par exemple l'empathie, la communication, l'écoute, etc.

6. Conclusion : représentation du cadre terminologique

Nous venons de voir que la formation s'articule autour de deux notions clés : connaissance et compétence. La connaissance en constitue la base et la compétence sa finalité. Les aptitudes (capacités, habiletés) et les savoirs (savoir, savoir-faire, savoir-être) sont des éléments intermédiaires permettant d'atteindre cette finalité.

Diverses représentations existent pour illustrer la notion de compétence.

Bottecchia [2] rapporte notamment que Jedliczka [3] propose une représentation des compétences, en optant pour une structure "atomique" où les connaissances en sont le noyau, les capacités des électrons intermédiaires, et les compétences des électrons de la couche externe (Figure 2.4).

Comme Jedliczka, nous proposons d'illustrer le cadre terminologique via l'analogie d'une structure "atomique".

Néanmoins, nous avons vu précédemment que pour la formation, la compétence constitue un objectif général, une finalité. Nous choisissons donc de représenter le cadre terminologique en plaçant, à l'inverse, la compétence au centre (Figure 2.5).

Les aptitudes en sont ainsi des éléments intermédiaires, où les habiletés diffèrent des capacités par spécificité contextuelle et par degré de virtuosité.

Enfin, les connaissances (déclaratives, procédurales et conditionnelles) constituent la couche externe de la représentation.

Ainsi, on peut voir le processus de formation comme un mouvement d'acquisition centré sur la compétence. Il va partir de ses connaissances (couche extérieure), pour centrer son développement vers la compétence (noyau), via l'acquisition d'aptitudes (couche intermédiaire).

Dans la suite de ce document, nous utilisons cette représentation afin de situer et d'illustrer nos travaux.



FIGURE 2.5: Représentation des notions terminologiques propres à la formation

II Réalité Virtuelle et technologies immersives

La définition de la Réalité Virtuelle, comme plus généralement celle des technologies immersives, est une question qui prête souvent à discussions.

Comme le souligne Fuchs [62], la démocratisation récente de ces technologies a amené des transformations et des discussions supplémentaires sur les définitions. Leur utilisation a mis en relief de nombreuses ambiguïtés, entraînant souvent des confusions. Fuchs identifie notamment l'origine de ces évolutions par l'appropriation de ces technologies dans le domaine du marketing et de l'innovation industrielle.

Lors de nos discussions avec différents acteurs du domaine industriel, nous avons rapidement constaté l'émergence de ces ambiguïtés. La Réalité Virtuelle est notamment souvent associée à un domaine technique, se résumant à l'utilisation d'interfaces d'affichage portées (visiocasques).

De plus, comme l'indique Fuchs, il est trop réducteur de considérer la Réalité Virtuelle comme un simple domaine technique propre à l'informatique. Pour l'auteur, *"il ne s'agit plus fondamentalement de traiter l'information, mais de percevoir et d'agir dans un environnement artificiel"*.

Dans cette section, nous cherchons à identifier différentes nuances terminologiques, nous permettant d'introduire les définitions que nous utilisons dans le cadre de nos travaux.

1. Réalité Virtuelle

Comme le rapportent Arnaldi et al. [70], au plus loin que l'on ait pu le tracer, l'apparition de cet oxymore aurait eu lieu dans le domaine du théâtre. Dans son recueil paru en 1938, Artaud [91] l'utilise afin de décrire la sensation d'illusion du spectateur.

Arnaldi et al. attribuent cependant sa première utilisation dans le sens technologique à Jaron Lanier, lors d'une conférence de presse en 1985. Ce chercheur a alors décrit de la sorte "*un espace de représentation réaliste en trois dimensions (3D), calculé en temps réel et immersif*".

Dans le langage courant, l'utilisation du terme semble suivre cette trajectoire technologiquement centrée. Comme nous venons de le mentionner, elle tend à être associée à l'utilisation de visiocasques. À l'instar de Fuchs [62], nous proposons de rejeter ces approches "techno-centrées". Comme il le stipule, en étant trop techniquement axées, elles en deviennent "*trop restrictives par rapport aux différents enjeux scientifiques et commerciaux*".

Fuchs propose de voir la définition de la Réalité Virtuelle au travers de trois différents niveaux :

- Sa *finalité* : "*permettre à une (ou plusieurs) personne(s) des activités sensorimotrices⁸ et cognitives⁹ dans un environnement artificiel, créé numériquement et pouvant être imaginaire, symbolique ou bien une simulation de certains aspects du monde réel*".
- Sa *définition technique*, établie avec Arnaldi et al. [92] : "*domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec une personne en immersion pseudo-naturelle*".
- Sa *définition fonctionnelle*, en tant que technologie permettant "*de s'extraire de la réalité physique pour changer virtuellement de temps, de lieu et/ou de type d'interaction*".

Dans le cadre de nos travaux, nous voulons explorer l'utilisation de la Réalité Virtuelle sur ses apports fonctionnels pour l'apprentissage. Ne souhaitant pas restreindre les pistes fonctionnelles explorées, nous choisissons de nous référer à la définition fonctionnelle, tout en incluant sa finalité. Nous proposons la définition anthropocentrée¹⁰ suivante pour la Réalité Virtuelle.

Réalité Virtuelle :

Technologie amenant ses utilisateurs à s'extraire de la réalité physique pour changer virtuellement de temps et/ou de type d'interaction, en leur permettant des activités sensorimotrices et cognitives dans un environnement artificiel, créé numériquement et avec lequel il va interagir.

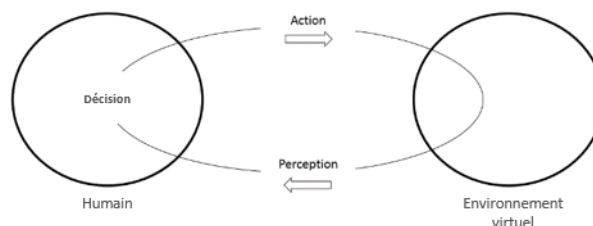


FIGURE 2.6: Boucle de "perception, décision, action" de Fuchs [4]

En plaçant l'utilisateur au centre du système, la notion d'interaction est primordiale pour cette définition de la Réalité Virtuelle. En reprenant des précédents travaux [93], Fuchs [4] étend sa définition fonctionnelle en déterminant un principe fondamental, la boucle de "perception, décision, action" (Figure 2.6) : "*dans toute application de Réalité Virtuelle, l'utilisateur est en immersion et en interaction avec un environnement virtuel. Il perçoit, décide et agit dans cet environnement*".

8. Activités sensorimotrices : activités liées à des activités sensorielles et motrices

9. Activités cognitives : activités liées à des processus mentaux

10. Centrée sur l'utilisateur

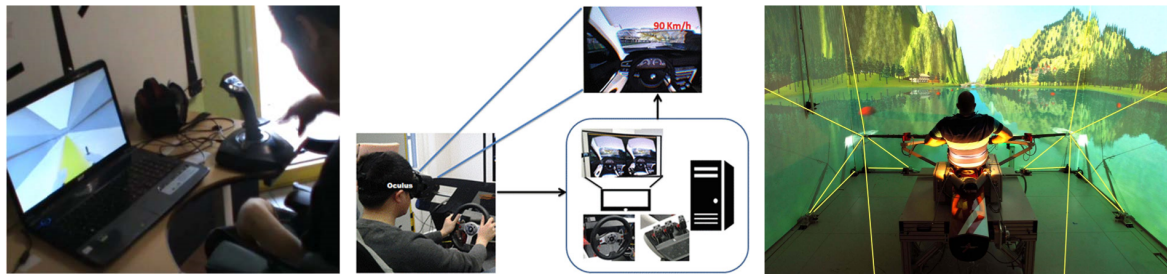


FIGURE 2.7: Exemple d'applications de Réalité Virtuelle aux concepts fondamentaux à la fois divers et à la fois potentiellement similaires : simulateur de fauteuil roulant (Rodriguez [5], gauche), simulateur de conduite automobile (Ihemedu-Steinke et al. [6], centre), simulateur d'aviron (Rauter et al. [7], droite)

En appliquant ce principe anthropocentré, nous pouvons qualifier de solution de Réalité Virtuelle, toute application avec laquelle l'utilisateur perçoit et interagit avec un environnement virtuel. Cette définition permet d'inclure des solutions aux principes fondamentaux similaires (Figure 2.7), mais implémentant des fonctionnalités diverses en utilisant différentes interfaces pour percevoir (ordinateurs, visiocasques, salle immersive, etc.) et interagir (clavier, souris, contrôleurs, gants connectés, etc.).

2. Autres technologies immersives : Réalité Augmentée et Réalité Mixte

Il convient de souligner qu'à la définition de Réalité Virtuelle, celle de Réalité Augmentée et celle de Réalité Mixte sont souvent associées ou confrontées.

Comme peut laisser supposer le mot "Réalité" commun aux trois termes, nous allons voir que ces technologies ont comme analogie de chercher à influencer en temps réel sur la perception de l'utilisateur. Elles vont chercher à rendre cette perception virtuelle, mixte, ou encore à l'augmenter.

Comme le souligne Fuchs [62], ces trois technologies ont des problématiques fondamentales tantôt communes, tantôt spécifiques. Pour englober ces technologies au sein d'une même définition, l'auteur propose d'ailleurs d'utiliser l'acronyme "RV+".

Ce terme nous semble cependant discutable. Il peut par exemple laisser sous-entendre que la Réalité Augmentée et la Réalité Mixte sont des extensions de la Réalité Virtuelle.

Nous proposons d'utiliser le terme technologies immersives pour définir l'ensemble de ces technologies (Réalités Virtuelle, Mixte et Augmentée).

Technologies immersives :

Ensemble de technologies visant à influencer en temps réel sur la perception de l'utilisateur (e.g. Réalité Virtuelle, Réalité Mixte, Réalité Augmentée).

Certains de nos travaux ont exploré des problématiques communes aux différentes technologies immersives, afin d'étudier et de concevoir des environnements d'apprentissage pertinents en Réalité Virtuelle. Afin de définir la Réalité Augmentée et la Réalité Mixte, nous avons souhaité nous inscrire dans la même démarche terminologique que pour la Réalité Virtuelle. Pour chacune de ces technologies, nous essayons de proposer ou retenir une définition anthropocentrée.

2.1. Définitions de la Réalité Augmentée

Selon Bottecchia [2], l'association des mots "Réalité" et "Augmentée" fut introduite par Caudell et Mizel [94] en 1992. Par ce terme, ces auteurs ont désigné "tout système permettant de combiner des entités virtuelles et des éléments physiques de l'environnement réel, en temps réel".

Les différentes définitions ont ensuite évolué avec le temps, allant tantôt vers une dimension techno-centrée, tantôt vers une dimension anthropocentrée.

Sur la dimension techno-centrée, Azuma [95] définit la Réalité Augmentée comme permettant à l'utilisateur de voir le monde réel par superposition d'objets réels sur des objets virtuels.

Pour lui, un système de Réalité Augmentée respecte trois règles fondamentales :

- combiner réel et virtuel ;
- interagir de manière interactive en temps réel ;
- être recalée en 3 dimensions.

Milgram et al. [96] ont ensuite proposé une définition également techno-centrée. Ils ont défini la Réalité Augmentée comme une extension de la Réalité Virtuelle, soit "*une forme de Réalité Virtuelle où le visiocasque est transparent, permettant une vue claire du monde réel*".

Comme Bottechia le souligne, ces définitions sont discutables sur le plan fonctionnel, car restrictives du fait de leur caractère techno-centré.

Fuchs propose une définition anthropocentrée, selon l'usage et l'association d'entités virtuelles avec le monde réel. Il oppose Réalité Augmentée et Réalité Mixte, en définissant le périmètre de la Réalité Augmentée "*lorsque la perception du monde réel est augmentée par des entités virtuelles afin de favoriser une meilleure observation du monde réel*".

Cette définition nous paraît cependant incomplète. Elle identifie l'augmentation du monde réel uniquement par l'observation. Elle ne mentionne ni la connaissance du monde réel, qui peut être augmentée, ni l'impératif d'un contexte pertinent nécessaire à l'augmentation. Par exemple, une application permettant l'affichage d'informations numériques au dessus d'un tableau permet d'en augmenter sa connaissance. Elle implique également une relation entre l'œuvre visualisée et l'information apportée.

Bottechia introduit la notion de liaison au contexte, en définissant la Réalité Augmentée comme une "*combinaison de l'espace physique avec l'espace numérique, dans un contexte sémantiquement lié*".

Arnaldi et al. [70] incluent la notion d'augmentation de la connaissance. Ils définissent la Réalité Augmentée comme consistant à "*enrichir la perception et la connaissance d'un évènement réel, par l'ajout d'informations numériques le concernant*". Cette définition leur permet notamment d'inclure les visites audio de musée comme des applications de Réalité Augmentée, car elles apportent des informations sonores aux visiteurs.

Afin d'établir une définition anthropocentrée de la Réalité Augmentée, nous proposons de combiner la définition de Bottechia et celle d'Arnaldi et al.

Réalité Augmentée :

Technologie enrichissant la perception et la connaissance d'éléments et/ou d'évènements réels, par l'apport d'informations numériques aux utilisateurs, dans un contexte sémantiquement lié.

En centrant cette définition autour de l'utilisateur tout en intégrant la notion d'augmentation par des informations numériques, nous incluons un éventail fonctionnel assez large permettant d'inclure des solutions aux principes fondamentaux similaires et aux applications techniques diverses (Figure 2.8¹¹).

2.2. Définitions de la Réalité Mixte

À la définition de Réalité Augmentée, tend à s'associer souvent celle de Réalité Mixte.

Les ambiguïtés entre les deux définitions proviennent en partie des définitions techno-centrées attribuées aux deux termes.

Milgram et Kishino [10] donnent par exemple une définition technique des environnements de Réalité Mixte. Ils les voient comme des environnements *dans lesquels les objets du monde réel et du monde virtuel sont tous présentés au sein d'un unique affichage*. Ils dressent le périmètre de la Réalité Mixte *n'importe où entre les extrémités d'un continuum de virtualité*, une échelle continue entre environnements réels et virtuels (Figure 2.9). Cette définition unifie Réalité Augmentée et Virtualité Augmentée¹², au sein d'un seul et même espace allant d'un environnement réel à un environnement virtuel.

11. Droite, musée des Plans-Reliefs de Paris, source : https://www.youtube.com/watch?v=x8uskAYFvAk&feature=emb_title

12. La Virtualité Augmentée consiste à importer des éléments réels dans un environnement virtuel



FIGURE 2.8: Exemple d'applications de Réalité Augmentée portant sur le même cas d'usage : la visite d'un musée (gauche : augmentation audio au Fitzwilliam Museum de Cambridge (Filippini et Bowen [8]); centre : augmentation mobile à l'Acropolis Museum d'Athènes (Khundam [9]); droite : musée des Plans-Reliefs de Paris)



FIGURE 2.9: Continuum de virtualité de Milgram et Kishino [10]

Comme le souligne Fuchs [62], cette approche est partiellement discutable d'un point de vue centré utilisateur. Il n'y a en effet pas de continuum pour l'utilisateur. Soit il perçoit, soit il ne perçoit pas le monde réel.

Fuchs propose une définition fonctionnelle, selon l'usage et l'association d'entités virtuelles avec le monde réel. Il voit la Réalité Mixte comme permettant "la création d'un nouvel environnement composé du monde réel avec des entités virtuelles, avec lesquelles l'utilisateur va pouvoir interagir". L'auteur place la création d'un nouvel environnement interactif au centre de la différence entre Réalité Mixte et Réalité Augmentée.

Cette définition fonctionnelle nous semble cependant discutable.

Premièrement, la notion d'interaction avec des entités virtuelles n'est pas incompatible avec la définition anthropocentrée de la Réalité Augmentée.

Dans un environnement augmenté, l'utilisateur peut très bien interagir avec les entités virtuelles. Si nous prenons l'exemple d'un système indiquant les pièces cachées d'un moteur, on peut très bien imaginer des fonctionnalités permettant à l'utilisateur d'interagir avec les entités virtuelles (e.g. masquer/afficher une pièce, obtenir les informations sur un élément, etc.).

Ensuite, le terme "entités virtuelles" est trop large.

Il ne permet par exemple pas de différencier une information d'une autre entité virtuelle, interagissant tant avec l'utilisateur qu'avec le monde réel, au sein d'un nouvel environnement mixte. Dans un environnement mixte, l'entité virtuelle ne se contente plus uniquement d'améliorer la perception et la connaissance de l'utilisateur. Elle est susceptible d'interagir avec lui et avec l'environnement physique.

Nous proposons donc de reprendre la définition fonctionnelle de Fuchs pour introduire une définition anthropocentrée de la Réalité Mixte.

Réalité Mixte :

Technologie positionnant l'utilisateur au sein d'un environnement mixte, dans lequel entités virtuelles et éléments réels interagissent entre elles et avec lui.

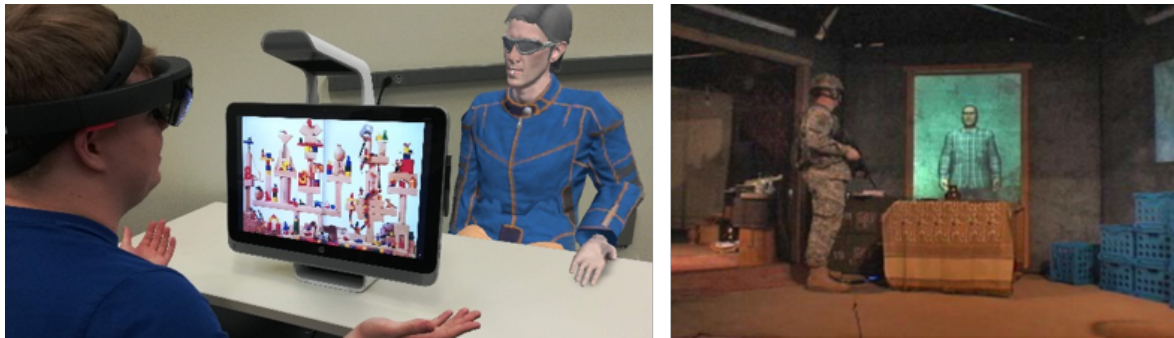


FIGURE 2.10: Exemple d'applications de Réalité Mixte au concept similaire (interaction avec un personnage virtuel) mais aux implémentations diverses : dans le champ de vision (Wang et al. [11], gauche), dans l'environnement réel (Kenny et al. [12], droite)

Cette définition centrée utilisateur permet d'inclure différents systèmes ayant des principes fondamentaux communs, sans restriction aucune aux interfaces utilisées. Il est possible d'imaginer des environnements mixtes incluant des entités virtuelles, en intégrant des interfaces permettant de les visualiser directement dans l'environnement réel, ou encore en les affichant dans le champ de vision de l'utilisateur (Figure 2.10).

III Interfaces, concepts fondamentaux et limites de la Réalité Virtuelle

Afin de répondre aux questions de pertinence de conception d'un outil en Réalité Virtuelle, il convient d'aborder au préalable les principales notions relatives à cette technologie. Notons toutefois que celles-ci peuvent être communes aux autres technologies immersives.

Nous débutons cette section en dressant un aperçu des interfaces utilisées en Réalité Virtuelle. Nous relevons notamment qu'un panel large d'interfaces peuvent être employées, afin de permettre à l'utilisateur de percevoir et d'interagir avec l'environnement virtuel.

Nous nous intéressons ensuite au concept clé qu'est la sensation de présence, ainsi qu'à certaines de ses composantes. Ce concept fondamental constitue un des éléments clés d'une application en Réalité Virtuelle, notamment lorsqu'il s'agit de formation.

Nous terminons en abordant la question des cybermalaises, une des limites à prendre en compte lors de la conception de systèmes en Réalité Virtuelle.

1. Interfaces utilisées en Réalité Virtuelle

Fuchs [62] propose d'identifier les interfaces utilisées en Réalité Virtuelle, selon trois catégories que nous choisissons de retenir :

- Les *interfaces sensorielles*.

Interfaces sensorielles (Fuchs [62]) :

Dispositifs matériels permettant la restitution sensorielle de l'environnement virtuel (image, son, efforts, etc.).

- Les *interfaces motrices*.

Interfaces motrices (Fuchs [62]) :

Dispositifs matériels captant les actions de l'utilisateur (mouvements, déplacements, voix, etc.).

— Les *interfaces sensorimotrices*.

Interfaces sensorimotrices (Fuchs [62]) :

Dispositifs matériels mixtes, permettant à la fois la restitution sensorielle et l'acquisition des actions à l'utilisateur.

Comme le précise l'auteur, l'utilisation du terme "interface" est faite distinctement de la notion d'Interface Homme-Machine ou de périphérique. Il s'agit uniquement de dispositifs matériels permettant d'accomplir la boucle de "*perception, décision, action*", positionnant l'utilisateur au centre du système de Réalité Virtuelle.

1.1. Interfaces sensorielles

1.1.1. Interfaces visuelles

La vue occupe une forte place parmi les différents sens de l'être humain. Les premières interfaces sensorielles auxquelles on pense en Réalité Virtuelle, sont donc naturellement les interfaces visuelles. En diffusant des images, ces dispositifs matériels vont chercher à modifier la perception de l'utilisateur en lui apportant des stimuli visuels.

Parmi ces interfaces visuelles, figurent bien évidemment les *visiocasques*. Comme nous l'avons précédemment mentionné, ces dispositifs d'affichage portés sont naturellement associés à la Réalité Virtuelle. L'utilisateur est équipé d'un dispositif matériel, consistant à positionner un ou plusieurs écrans en face de ses yeux, afin de lui apporter une vision monoscopique¹³ ou stéréoscopique¹⁴ de l'environnement virtuel.



FIGURE 2.11: Exemple de visiocasques : Google Daydream View (gauche) et HTC Vive (droite)

Ses mouvements dans l'environnement réel sont alors suivis, permettant ainsi de synchroniser les images avec l'orientation de sa tête dans l'environnement virtuel.

Afin d'assurer l'affichage de l'environnement virtuel et le suivi de l'utilisateur dans l'environnement réel, différents types de visiocasques existent. Certains, comme le Google Daydream View¹⁵ (Figure 2.11, gauche), utilisent des smartphones dont les écrans diffusent les images par le biais de lentilles intégrées au visiocasque, pendant que leurs capteurs d'orientation permettent de connaître en temps réel la position de la tête. D'autres, comme le HTC Vive¹⁶ (Figure 2.11, droite) fonctionnent avec un ordinateur.

13. Monoscopie : par opposition à la stéréoscopie, méthode permettant la perception en relief d'une image plane

14. Stéréoscopie : ensemble des procédés permettant de restituer l'impression de vision en relief, à partir d'images planes (source : TLFi du CNRTL : <http://www.cnrtl.fr/definition/>)

15. <https://arvr.google.com/daydream/smartphonevr/>

16. <https://www.vive.com/us/>



FIGURE 2.12: Exemple de visiocasque transparent : l'Hololens 2 de Microsoft



FIGURE 2.13: Exemple d'interfaces à écrans fixes : écran projeté (Riecke et al. [13], gauche) et salle immersive (Kainz [14] droite)

Les écrans et les lentilles diffusant les images sont directement intégrés à ces casques, qui comportent leur propre système de capteurs permettant d'analyser en temps réel la position de la tête.

Enfin, bien que ce soit naturellement le cas en Réalité Virtuelle, notons que l'opacité n'est pas une caractéristique sine qua non des visiocasques. Certains n'adoptent pas cette particularité, afin de permettre une utilisation pour les autres technologies immersives (Figure 2.12¹⁷).

Comme nous l'avons mentionné, les visiocasques ont connu une démocratisation dans le courant des années 2010, avec l'apparition sur le marché de nouveaux matériels moins coûteux et donc plus accessibles.

Cependant, afin de rester dans une dimension anthropocentrée, il est important de souligner que d'autres interfaces visuelles sont utilisées pour la Réalité Virtuelle.

Fuchs [62] les catégorise ainsi :

— Les *interfaces à écrans fixes*.

Incluant les écrans fixes de nos ordinateurs et de nos télévisions, cette catégorie inclue d'autres interfaces visuelles, comme par exemple les supports projetés (Figure 2.13, gauche), ou encore les salles immersives (Figure 2.13, droite).

17. Source : <https://www.microsoft.com/en-us/hololens/hardware>

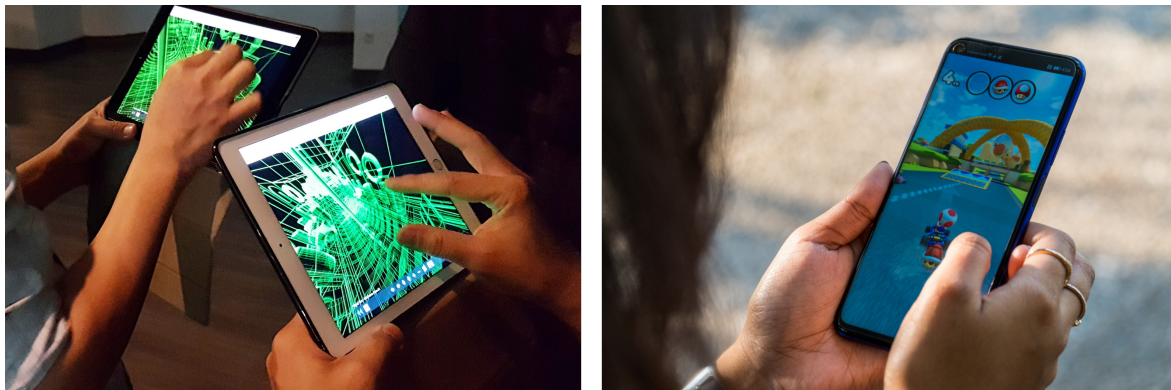


FIGURE 2.14: Exemple d'applications de Réalité Virtuelle sur des interfaces à écrans fixes : tablette (See et al. [15], gauche) et smartphone (droite)

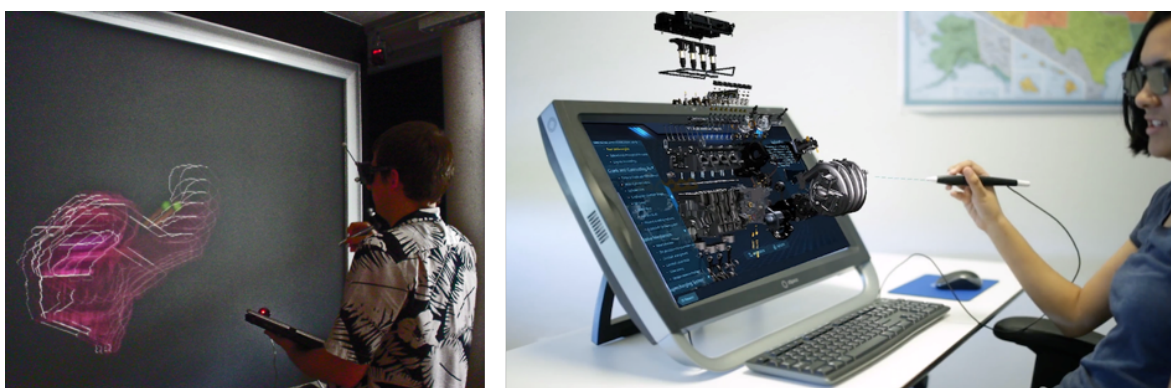


FIGURE 2.15: Exemple d'interfaces d'écrans à dispositions variables : travaux de Leigh et al. [16] sur grand écran (gauche) et dispositif zSpace (droite)

Ces dernières sont équipées d'installations consistant à diffuser l'environnement virtuel à l'échelle réelle. Un ou plusieurs vidéoprojecteurs viennent afficher les images sur des supports faisant office de murs, de planchers et de plafonds.

— Les *interfaces à écrans mobiles*.

Cette catégorie comprend les dispositifs matériels tels que par exemple les tablettes et les smartphones (Figure 2.14).

— Les *interfaces d'écrans à dispositions variables*

Cette catégorie, que nous préférons dissocier de celle à écrans mobiles, comprend des dispositifs matériels permettant un affichage stéréoscopique sur un écran fixe (Figure 2.15¹⁸). L'utilisateur est équipé de lunettes dont la position est suivie en temps réel par le système, permettant d'afficher l'image stéréoscopique correspondant à sa position par rapport à l'objet.

1.1.2. Autres interfaces sensorielles

Si la perception visuelle est largement concernée par différentes interfaces, il faut souligner que d'autres interfaces sensorielles visent à agir sur d'autres perceptions de l'utilisateur.

Fuchs [62] identifie d'autres catégories d'interfaces sensorielles :

18. Dispositif zSpace (droite), source : <https://zspace.com/>



FIGURE 2.16: Exemple d’interfaces acoustiques intégrées aux visiocasques : casque stéréophonique du HTC Vive Pro (gauche) et dispositif sonore par conductance osseuse intégré au prototype VR Headset de Panasonic (droite), présenté lors du CES 2017

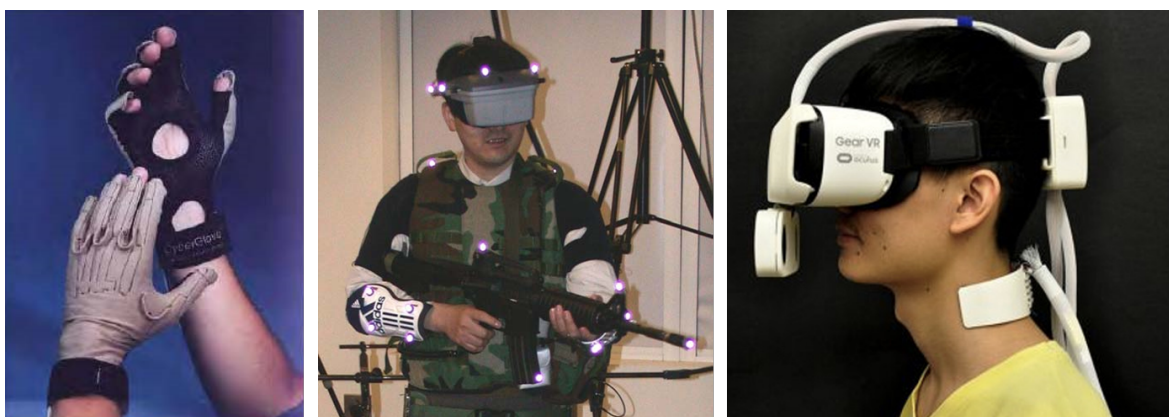


FIGURE 2.17: Exemple d’interfaces tactiles : gants tactiles Cybergloves (gauche, Billingham et Buxton [17] rapporté par Hasanuzzaman et Ueno [18]), veste vibrotactile Tactavest (centre, Lindeman et al. [19]) et dispositif de thermoception Ambiotherm (droite, Ranasinghe et al. [20])

— Les *interfaces acoustiques*.

Destinées à diffuser des stimuli sonores correspondant à l’environnement virtuel à l’utilisateur, elles peuvent prendre différentes formes.

Il peut s’agir de hauts parleurs disposés dans l’environnement réel, d’écouteurs, de casques audio, ou encore de dispositifs sonores par conductance osseuse.

Certains visiocasques intègrent d’ailleurs directement des interfaces acoustiques (Figure 2.16¹⁹).

— Les *interfaces tactiles*.

Ces interfaces transmettent des stimuli tactiles aux utilisateurs, conformément à leurs interactions avec l’environnement virtuel.

Elles vont chercher à altérer son toucher et sa thermoception, afin d’accroître sa perception de l’environnement.

Parmi ces interfaces, on peut citer les gants tactiles, les vestes tactiles, ou encore tout dispositif matériel permettant de ressentir une température (Figure 2.17²⁰).

19. Sources : HTC Vive Pro (gauche), <https://www.vive.com/uk/product/vive-pro-full-kit/>; VR Headset de Panasonic (droite), <https://www.realite-virtuelle.com/vr-headset-panasonic-prototype-1201/>
 20. Ambiotherm (droite) : <https://pravarjain.com/work/ambiotherm/>



FIGURE 2.18: Exemple d'interface olfactive : le dispositif commercial Feelreal



FIGURE 2.19: Exemple d'interfaces à simulation de mouvement : travaux de Codd et al. [21] sur un siège à stimulation de mouvements (gauche), dispositif commercial Icaros pro (droite, utilisé par Dkebska et al. [22])

— Les *interfaces olfactives*.

En diffusant des odeurs spécifiques à destination de l'utilisateur, ces interfaces vont agir sur son odorat afin d'amplifier sa perception de l'environnement virtuel (Figure 2.18²¹).

— Les *interfaces à simulation de mouvement*.

Ces interfaces vont chercher à agir sur l'utilisateur afin d'influencer la perception de la position des différentes parties de son corps (proprioception). Elles vont modifier l'orientation de son corps dans l'espace et/ou lui faire subir des accélérations (Figure 2.19²²).

1.2. Interfaces motrices

Pour capter les actions de l'utilisateur, les interfaces motrices vont chercher à analyser différents éléments tels que ses mouvements, ses déplacements, ou encore sa voix.

Certaines de ces interfaces (contrôleurs, micros, etc.) sont d'ailleurs souvent nativement associées et intégrées aux interfaces sensorielles. Il est par exemple fréquent qu'un visiocasque ou qu'une salle immersive soient équipés de leur propre contrôleur.

21. Source : <https://feelreal.com/>

22. Icaros pro (droite) : <https://www.icaros.com/en/products/icaros-pro/>



FIGURE 2.20: Exemple d'interfaces de commande et d'interaction : contrôleur Vive Controller du visiocasque HTC Vive (gauche), pointeur spatialisé utilisé dans une salle immersive (centre, Winkes et Aurich [23]), gants connectés Manus VR Prime One (droite)



FIGURE 2.21: Exemple de plateformes directionnelles : tapis monodirectionnel (gauche, Dockx et al. [24]), tapis omnidirectionnel (centre, Robuffo et al. [25]), dispositif commercial de plateforme omnidirectionnelle Virtuix Omni (droite, utilisé par Dkebska et al. [22])

Fuchs [62] identifie trois principales catégories d'interfaces motrices :

— Les *interfaces de commande et d'interaction*.

Ces interfaces vont permettre à l'utilisateur d'interagir avec l'environnement. Pour cela, le système va analyser les comportements de l'utilisateur, afin de les répercuter avec cohérence dans l'environnement virtuel.

Les interfaces de commande et d'interaction peuvent présenter différents niveaux de complexité. Il peut simplement s'agir de claviers, souris, manettes, ou de micros associés à un système de reconnaissance vocale. Elles peuvent être plus complexes en reconnaissant les mouvements de l'utilisateur dans l'environnement réel, comme par exemple des contrôleurs associés aux visiocasques (Figure 2.20, gauche²³), des pointeurs spatialisés (Figure 2.20, centre), ou encore des gants connectés (Figure 2.20, droite²⁴).

— Les *plateformes directionnelles* (ou *tapis roulants*).

Ces interfaces vont permettre de capter les mouvements de l'utilisateur en le positionnant en situation de déplacement simulé. Il peut s'agir de tapis littéralement roulants, au sens mécanique du terme. Ils peuvent être monodirectionnels (Figure 2.21, gauche) ou omnidirectionnels (Figure 2.21, centre). Cette catégorie inclue également des plateformes omnidirectionnelles, permettant de détecter les déplacements par frottements sur une surface lisse et/ou analysent d'autres mouvements tels que des sauts ou des accroupissements (Figure 2.21, droite²⁵).

23. Source : <https://www.roadtovr.com/ces-2018-htc-vive-pro-controllers-updated-wand-design-not-valve-knuckles/>

24. Source : <https://manus-vr.com/prime-one-gloves/>

25. Source : <https://www.virtuix.com/>



FIGURE 2.22: Exemple d'interfaces de localisation corporelle : capteur Vive Tracker (gauche, utilisé par Salvetti et al. [26]), combinaison de suivi de mouvements (centre, Hamilton-Giachristis et al. [27]), système Microsoft Kinect (droite)



FIGURE 2.23: Exemple d'interfaces sensorimotrices : Haption Virtuose 6D (gauche, Iacob et Popescu [28]) et gant à retour d'efforts Dexmo (droite)

Ces dernières interfaces s'éloignant du fonctionnement d'un tapis roulant, nous préférons parler de "plateformes directionnelles" pour caractériser ces interfaces.

— Les *interfaces de localisation corporelle*.

Ces interfaces ont pour principe de détecter les mouvements du corps de l'utilisateur afin de répercuter ses mouvements dans l'environnement virtuel. Il peut s'agir de simples capteurs équipant certains membres de l'utilisateur (Figure 2.22, gauche²⁶), de combinaisons de suivi de mouvements plus complètes (Figure 2.22, centre), ou encore de systèmes de capture uniquement externalisés (Figure 2.22, droite²⁷).

1.3. Interfaces sensorimotrices

Les interfaces sensorimotrices sont des interfaces mixtes, à la fois sensorielles et motrices. Elles apportent une restitution sensorielle à l'utilisateur, tout en permettant l'acquisition de ses actions.

Certaines de ces interfaces sont des dispositifs matériels dont l'utilisateur va se saisir pour interagir avec l'environnement virtuel tout en recevant un retour d'effort (Figure 2.23, gauche²⁸).

Elles peuvent aussi être portées, comme par exemple les gants à retour d'effort (Figure 2.23, droite²⁹) et autres exosquelettes.

26. Source : <https://www.vive.com/eu/vive-tracker/>

27. Source : <https://www.extremetech.com/extreme/160162-making-gesture-recognition-work-lessons-from-microsoft-kinect-and-leap>

28. Source : <https://www.haption.com/fr/products-fr/virtuose-6d-fr.html>

29. Source : <https://www.dextarobotics.com/en-us/experience>

2. Sensation de présence

Toutes les interfaces que nous venons de présenter ont la même finalité : altérer la perception et/ou capter les actions de l'utilisateur.

L'objectif de l'utilisation de ces interfaces consiste à activer la sensation de présence de l'utilisateur.

À partir de ses définitions dans la littérature, nous introduisons dans cette section ce concept fondamental de la Réalité Virtuelle.

Nous abordons également certaines de ses composantes principales.

Enfin, nous analysons succinctement le rôle de la sensation de présence au sein d'un outil dédié à l'apprentissage en Réalité Virtuelle.

2.1. Sensation de présence

De nombreux travaux ont essayé de définir et/ou de mesurer la sensation de présence.

Selon Lombard³⁰, la notion de présence a initialement été introduite en 1980 par Minsky [97], via celle de "*téléprésence*". Ce terme a été utilisé afin de définir des systèmes de téléopération permettant à un opérateur de "*voir et ressentir ce qui se passe*" sur un lieu distant.

La définition de la sensation de présence a ensuite dérivé de ce terme, notamment par Slater et al. [98] qui l'ont défini comme "*la sensation subjective d'"être là" dans le monde virtuel*".

En reprenant plusieurs travaux de la littérature, Bystrom et al. [99] apportent une définition relativement similaire. Ils voient la sensation de présence comme le "*degré avec lequel les utilisateurs ressentent être ailleurs que dans leur environnement physique*".

Comme le soulignent Mantovani et Castelnuovo [100], la sensation de présence est assimilable à un état de conscience dépendant de différents facteurs, éloignant l'utilisateur de la sensation d'être présent dans son environnement physique.

Nous proposons de définir la sensation de présence conformément à ces différentes définitions.

Sensation de présence :

Degré avec lequel un utilisateur atteint un état de conscience l'amenant à se sentir tant présent dans un environnement virtuel (ou mixte), qu'éloigné de son environnement physique.

Lombard et Ditton [101] identifient plusieurs facteurs à la sensation de présence.

Parmi ceux-ci, ils citent notamment la notion de présence sociale. Elle correspond à la sensation d'être socialement en présence d'un interlocuteur via un moyen de communication. Cette sensation se construit par la perception de cet interlocuteur, ainsi que par l'interaction avec celui-ci.

Par extension, il est possible de voir la sensation de présence sociale comme cette même sensation d'être en présence d'un interlocuteur au sein de l'environnement virtuel, qu'il soit réel ou non.

Nous proposons donc de définir la sensation de présence sociale comme suit.

Sensation de présence sociale :

Degré avec lequel un utilisateur atteint un état de conscience, l'amenant à se sentir en présence d'un interlocuteur (réel ou virtuel), au sein d'un environnement virtuel (ou mixte).

Nos travaux pouvant nous amener à utiliser des personnages virtuels en Réalité Virtuelle, nous prenons soin de différencier la sensation de présence de la sensation de présence sociale, une de ses différentes composantes.

2.2. Composantes principales de la sensation de présence et notions associées

Au delà de la présence sociale, il est important d'identifier d'autres facteurs à l'origine de la sensation de présence.

30. http://matthewlombard.com/research/p2_ab.html

2.2.1. Engagement

Parmi ces différentes composantes, nous pouvons citer la notion d'"engagement" (ou "involvement" en anglais).

Witmer [102] propose une définition de l'engagement que nous proposons de retenir.

Engagement (Witmer [102]) :

État psychologique vécu en conséquence de la concentration, de l'énergie et de l'attention, sur un ensemble cohérent de stimuli, d'activités ou d'événements liés de manière significative.

L'engagement peut être vu comme une sensation de captation, de focalisation de l'attention vers l'environnement virtuel, impliquant une perte de conscience du monde réel.

Comme nous l'abordons plus tard, l'engagement est de fait souvent analysé par les outils destinés à mesurer la sensation de présence.

2.2.2. Fidélité (ou réalisme ressenti)

Ces outils étudient également le réalisme de l'environnement virtuel, ressenti par les utilisateurs. Cette notion fait écho à celle de "fidélité", souvent utilisée pour qualifier le réalisme des simulateurs destinés à la formation.

En reprenant différents travaux, Liu et al. [103] associent la notion de fidélité à un terme générique, défini de façon suivante.

Fidélité (Liu et al. [103]) :

Degré avec lequel une simulation reproduit l'environnement réel.

Dans le cadre de nos travaux, nous utilisons ce terme selon cette définition large.

Notons toutefois que Liu et al. identifient différents types de fidélité pouvant être traités et analysés indépendamment (fidélité physique, fidélité audiovisuelle, fidélité d'équipement, fidélité de mouvement, fidélité cognitive, fidélité de tâche, etc.).

Pour la formation, la notion de fidélité a été largement étudiée. Jouer sur les différents degrés de fidélité, peut en effet permettre de former le plus efficacement possible les apprenants.

Dans le domaine médical par exemple, Reznick et MacRae [104] relèvent que l'efficacité des niveaux de fidélité varie selon le niveau d'expertise des apprenants. Alors qu'un niveau de fidélité restreint favorise l'apprentissage de novices, un niveau de fidélité élevé serait en revanche nécessaire pour des apprenants expérimentés.

2.2.3. Immersion et présence spatiale

Les définitions ne s'accordent pas forcément au sujet de la notion d'immersion.

Witmer [102] définit par exemple l'immersion comme une composante de la sensation de présence. Il voit l'immersion comme un état psychologique correspondant au fait de se sentir enveloppé, inclus dans un environnement virtuel interactif, par le biais de stimuli.

Si l'on se réfère aux travaux de Schubert et al. [105], cette définition correspond plus à ce que les auteurs identifient comme la "sensation de présence spatiale", là aussi une composante de la sensation de présence.

Pour ces auteurs, l'immersion est plus vue de la manière suivante³¹.

Immersion (Schubert et al. [105]) :

Variable technologique pouvant être objectivement décrite, i.e. en analysant les caractéristiques des interfaces sensorielles et motrices utilisées.

Nous proposons de retenir cette définition.

31. Source : <http://www.igroup.org/pq/ipq/construction.php>

Mantovani et Castelnovo [100] abondent dans le même sens en soulignant qu'il est important de différencier immersion et sensation de présence. Ils attribuent aussi la notion d'immersion à l'aspect technologique (e.g. caractéristiques des interfaces visuelles utilisées), en l'opposant à la sensation de présence qui correspond plus à un état de conscience chez l'utilisateur.

Avec la volonté d'étudier l'utilisation de la Réalité Virtuelle en considérant l'apprenant au centre du système d'apprentissage, nous utilisons ainsi le terme de "présence spatiale" lorsque nous cherchons à analyser ses sensations telles que les décrits Witmer.

Présence spatiale ("immersion" de Witmer [102]) :

État psychologique correspondant au fait de se sentir enveloppé, inclus dans un environnement virtuel interactif, par le biais de stimuli.

2.3. Sensation de présence et apprentissage

La sensation de présence a fait l'objet de nombreux travaux et d'analyses, destinés à évaluer ses effets sur l'apprentissage.

Dans leur analyse de l'impact de la sensation de présence en environnement virtuels sur l'apprentissage, Mantovani et Castelnovo [100] soulignent par exemple que différents travaux mentionnent les bénéfices de la sensation de présence sur le transfert de connaissances et sur le développement de compétences.

D'autres auteurs tels que Stanney et al. [106] suggèrent qu'une sensation de présence accrue permet d'atteindre de meilleures performances dans l'accomplissement d'une tâche. Ils avancent que cet accroissement favorise un meilleur transfert de compétences vers le monde réel.

Comme l'analysent Usoh et al. [107], une forte sensation de présence augmente les similitudes entre les comportements expérimentés dans l'environnement virtuel et ceux attendus dans le monde réel.

Selon ces différents auteurs, la sensation de présence en environnement virtuel a donc un impact positif sur l'apprentissage. En simulant ses agissements, en sollicitant ses habiletés, en produisant des cheminements de pensée comme s'il était en situation réelle, l'apprenant va pouvoir vivre une situation lui permettant de développer son expérience sur le sujet de l'apprentissage.

Cependant, mesurer seulement une sensation de présence élevée ne suffit pas à garantir des bénéfices sur la démarche d'apprentissage. Par exemple, si les fonctionnalités du système sont insuffisantes (e.g. absence d'informations, de consignes, de feedback, etc.), l'apprenant peut se sentir présent au sein de l'environnement virtuel sans toutefois améliorer le développement de ses compétences.

Lors de l'analyse d'un environnement d'apprentissage en Réalité Virtuelle, la sensation de présence reste donc principalement un indice prérequis à analyser, afin d'envisager des apports pédagogiques.

3. Cybermalaises et incohérences sensorimotrices

Une des principales limites de la Réalité Virtuelle concerne les cybermalaises.

Le terme "cybermalaise" ("*cybersickness*" en anglais) a été proposé en 1992 par McCauley et Sharkey [108]. Ils ont ainsi décrit des symptômes ressemblant à ceux du mal des transport, ressentis au cours de déplacements au sein d'environnements virtuels.

Si le terme est encore parfois associé au mal des transport, il faut souligner qu'il a ensuite été élargi. Les travaux de Kennedy et al. [109] ont notamment associé des symptômes supplémentaires aux cybermalaises, qui s'éloignent de ceux du mal des transport (e.g. fatigue visuelle, troubles d'accommodation, vision floue, fatigue, etc.).

Dans le cadre de nos travaux, nous proposons de retenir une définition élargie des cybermalaises.

Cybermalaises :

Ensemble de différents symptômes pouvant être ressentis au sein d'environnements virtuels (ou mixtes).

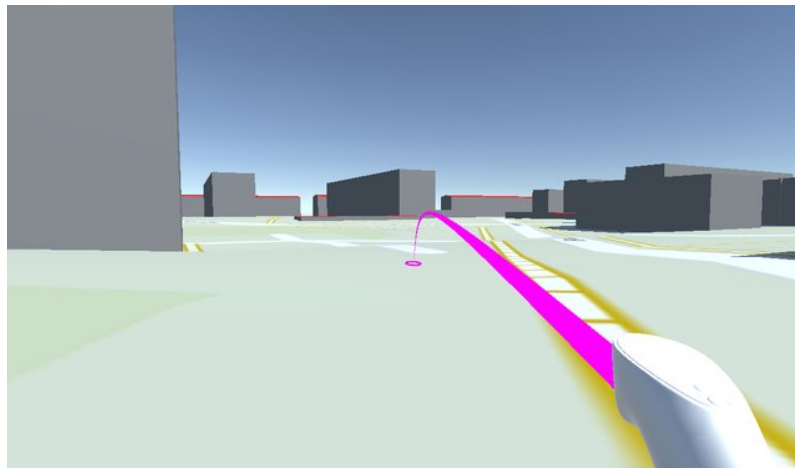


FIGURE 2.24: Exemple de méthode de déplacement (téléportation) permettant de limiter les incohérences sensorimotrices (Berger et Bill [29])

De nombreux auteurs ont analysé l'origine du mal des transports dans les simulateurs.

Selon Oman [110], il est largement admis que cet effet est causé par un incohérence entre les stimuli sensoriels fournis par le simulateur et ceux attendus par les voies neuronales dans l'environnement réel.

Par extension, Kennedy et al. soulignent que les origines physiologiques sont communes aux différents cybermalaises. La communauté scientifique s'accorde pour expliquer ces phénomènes par des incohérences entre les stimuli provenant de l'environnement virtuel et ceux de l'environnement réel.

LaViola [111] reprend par exemple les travaux de Reason et Brand [112], qui ont formulé une "*théorie de conflits sensoriels*" (*sensory conflict theory*), se basant là aussi sur les divergences entre les sens de l'utilisateur et les stimuli apportés par le simulateur.

Dans la littérature francophone, Fuchs [62] utilise le terme d'"*incohérences sensorimotrices*" pour définir ces divergences.

Incohérences sensorimotrices (Fuchs [62]) :

Incohérences du comportement sensorimoteur du sujet dans le monde réel, avec celui dans le monde virtuel.

Pour assurer une conception pertinente de tout système de Réalité Virtuelle, il convient d'éviter ces effets afin de garantir qu'il soit convenablement utilisable par une population d'utilisateurs.

Dans ses travaux, Fuchs identifie certaines recommandations afin de limiter ou d'éviter ces incohérences.

Par exemple, pour atténuer les incohérences sensorimotrices liées au déplacement dans l'environnement virtuel, il peut être intéressant de limiter les accélérations et les inclinaisons de la caméra virtuelle.

Utiliser des métaphores d'interaction permettant à l'utilisateur de se déplacer dans l'environnement (Figure 2.24), peut par exemple être une solution permettant d'éviter des cybermalaises liés à des incohérences sensorimotrices survenues au cours du déplacement.

IV Analyser la pertinence l'outil de formation en Réalité Virtuelle

Maintenant que nous avons identifié les différents éléments et les limites à prendre en compte lors de la conception de l'outil en Réalité Virtuelle, nous souhaitons nous intéresser aux manières de vérifier que les différents choix de conception sont correctement adaptés.

Dans cette sous-section, nous proposons de relever divers outils et méthodes nous permettant d'évaluer un outil immersif d'apprentissage.

TABLE 2.1: Scores SUS, grades lettrés de Sauro [30] et évaluation adjectivales d'utilisabilité proposées par la communauté UIUXTrend

Scores SUS	Grades	Évaluation adjectivale
> 80.3	A	Excellent
68-80.3	B	Bon
68	C	OK
51-68	D	Pauvre
< 51	F	Affreuse

Nous souhaitons analyser la pertinence de l'outil selon deux dimensions :

- la pertinence de conception de l'outil immersif, i.e. que le système de Réalité Virtuelle est correctement adapté à l'utilisation par n'importe quel apprenant ;
- la pertinence de pédagogie de l'outil de formation, i.e. que l'outil apporte une plus-value en terme d'apprentissage.

Pour chacune de ces dimensions, la plupart des méthodes permettant d'analyser la pertinence de l'outil peuvent être :

- objectives, i.e. consistant à analyser des signaux et des données provenant des apprenants eux-mêmes, ou d'actions qu'ils ont effectué ;
- subjectives, i.e. visant à étudier des retours sciemment transmis par les sujets (e.g. questionnaires, retours oraux, etc.).

Enfin, nous nous intéressons à l'utilisation d'outils statistiques, permettant de mettre en place des méthodologies afin de vérifier la pertinence des outils d'apprentissage en Réalité Virtuelle. Lors de comparaisons d'échantillons de données provenant directement ou indirectement des apprenants, ces tests statistiques permettent de valider des différences observées et en garantissant qu'elles ne soient pas liées à des effets de hasard.

1. Pertinence de conception de l'outil immersif

1.1. Évaluation de l'utilisabilité d'un outil

L'utilisabilité est une notion permettant de définir l'aptitude à l'utilisation d'un produit, en fonction de trois critères :

- l'*efficacité*, i.e. permettre aux utilisateurs d'atteindre un résultat prévu ;
- l'*efficience*, i.e. atteindre ce résultat prévu dans un temps minimal et avec un effort moindre ;
- la *satisfaction*, i.e. le fait d'atteindre ce résultat dans un confort d'utilisation et d'interaction pour l'utilisateur.

S'appliquant plus largement qu'aux outils immersifs uniquement, l'utilisabilité est définie par la norme ISO 924-11 comme suit.

Utilisabilité (ISO 924-11) :

Degré selon lequel un produit peut être utilisé, par des utilisateurs identifiés, pour atteindre des buts définis avec efficacité, efficience et satisfaction dans un contexte d'utilisation spécifique.

Brooke et al. [113] proposent de mesurer l'utilisabilité à partir d'un questionnaire rempli par les utilisateurs, puis de calculer un score d'utilisabilité à partir des réponses recueillies. Ce questionnaire est communément appelé *System Usability Scale* (SUS).

Afin d'interpréter les résultats des scores SUS, Sauro [30] propose de les normaliser et de les comparer à la distribution en centiles des scores issus de plus de 500 études (Figure 2.25). Sauro segmente cette distribution en différents grades lettrés, allant de F à A.

Enfin, il est intéressant de noter que certaines communautés autour de l'expérience utilisateur, proposent une évaluation adjectivale de ces grades (Table 2.1³²).

32. Source : <https://uiuxtrend.com/measuring-system-usability-scale-sus/>

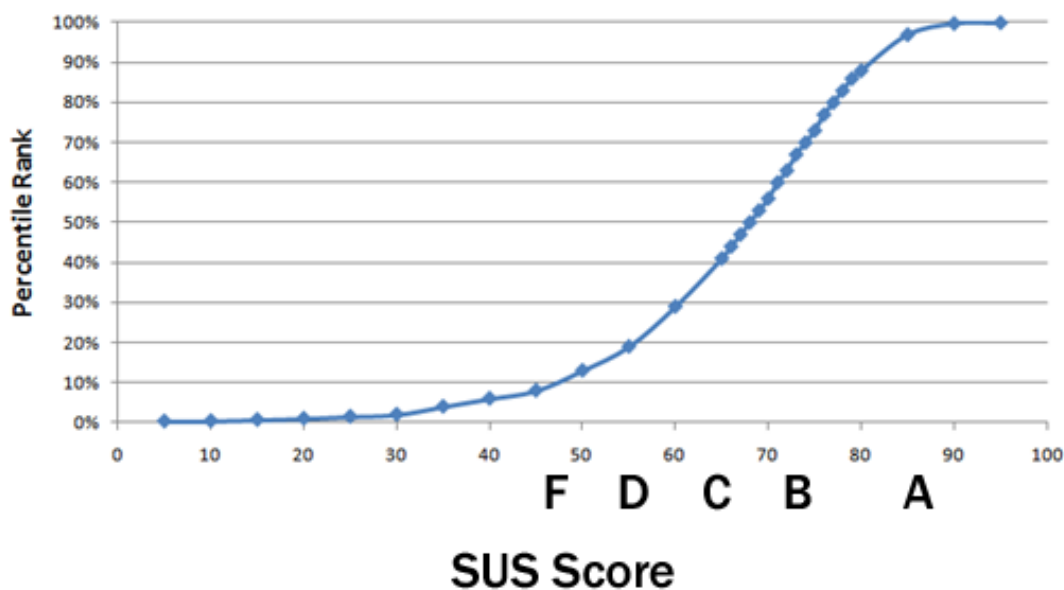


FIGURE 2.25: Distribution des scores SUS par centiles selon Sauro [30]

1.2. Mesure de la sensation de présence

Comme le soulignent Coelho et al. [114], des méthodes subjectives et objectives existent pour mesurer la sensation de présence.

1.2.1. Mesures subjectives de la sensation de présence

En sollicitant une introspection de la part des sujets, ces méthodes consistent à récolter leurs opinions personnelles concernant leur ressenti. Après avoir analysé leurs sensations à posteriori, ils vont ainsi comparer leur expérience dans l'environnement virtuel avec celle du monde réel.

Il s'agit des méthodes les plus fréquemment utilisées afin de mesurer la sensation de présence. Bon nombre d'auteurs proposent aux sujets de remplir des échelles de mesure. Coelho et al. [114] soulignent que certains recommandent de remplir ces questionnaires immédiatement après avoir utilisé le système, plutôt que pendant son utilisation [115].

Pour analyser la sensation de présence, Schubert [105] a notamment construit un questionnaire psychologique, l'*Igroup Presence Questionnaire (IPQ)*.

À partir de travaux amonts [116, 117, 118, 119] et en s'appuyant sur plusieurs études mobilisant des centaines de participants, Schubert et ses collaborateurs ont élaboré ce questionnaire sous la forme d'un ensemble d'échelles de Likert [120].

Le questionnaire est constitué d'un élément sur la sensation de *Présence Générale*, associé à trois composantes principales que nous venons de présenter :

- La présence spatiale, mesurée à partir de 5 éléments du questionnaire.
- L'engagement, structuré autour de 4 éléments du questionnaire.
- Le réalisme ressenti (i.e. fidélité visuelle de l'environnement virtuel), concerné par 4 éléments du questionnaire.

Il faut noter que certains items de ce questionnaire doivent être inversés avant de les exploiter ³³.

D'autres échelles de mesure de la sensation de présence sont souvent citées dans la littérature.

Witmer et al. [121] proposent par exemple le *Presence Questionnaire (PQ)*, un questionnaire de 32 éléments structurant 4 sous-échelles : l'*engagement*, l'*adaptation/immersion*, la *fidélité sensorielle* et la *qualité d'interface*. Ces auteurs ont également produit un autre questionnaire (*Immersive Tendencies Questionnaire (ITQ)*) [102], destiné à mesurer les capacités ainsi que les propensions d'engagement et d'immersion dans l'environnement virtuel.

33. Items SP2, INV3, REAL1. Source : <http://www.igroup.org/pq/ipq/data.php>

D'autres exemples sont fréquemment cités dans la littérature. On notera l'*UCL Presence questionnaire* [98], le *Reality Judgment Presence questionnaire* [122] ou encore l'*ITC-Sense Of Presence Inventory* (ITC-SOPI) [123].

Des questionnaires de mesure subjective existent pour mesurer la sensation de présence sociale. Bailenson et al. [124] ont par exemple proposé un questionnaire pour évaluer la présence sociale à partir de 5 items.

Mais nous retenons surtout le **Temple Presence Inventory (TPI)** de Lombard et al. [101, 125]. Réalisé et vérifié à partir d'études de la littérature sur la sensation de présence, il est composé de 39 items articulés en 8 composantes :

- La présence spatiale (7 items).
- L'engagement (6 items).
- L'*interaction parasociale (Parasocial interaction)* (7 items).
Elle correspond à la sensation d'être présent au même endroit qu'une ou plusieurs personnes, ainsi que pouvoir et vouloir interagir avec elles.
- L'*interaction passive interpersonnelle (Passive interpersonal)* (4 items).
Elle concerne le ressenti d'avoir vécu une interaction passive avec une ou plusieurs personnes. Elle peut être vue comme la sensation d'obtenir, par différents canaux, des informations de la part de son(ses) interlocuteur(s) : expressions faciales, ton de voix, style vestimentaire, langage corporel.
- L'*interaction active interpersonnelle (Active interpersonal)* (3 items).
Elle mesure la volonté, l'envie de l'utilisateur d'interagir et de réagir naturellement avec une ou plusieurs personnes, que ce soit par des moyens verbaux (paroles, exclamations) ou non-verbaux (sourire).
- La *richesse sociale (Social richness)* (7 items).
Elle vise à établir la richesse de l'interaction, de par sa dynamique et sa dimension émotionnelle.
- Le *réalisme social (Social realism)* (3 items).
Il évalue la richesse de l'interaction, par son réalisme et sa pertinence.
- Le *réalisme perceptif (Perceptual realism)* (5 items).
Il correspond à la fidélité perçue, tant pour l'environnement virtuel que pour les personnages le composant.

1.2.2. Mesures objectives de la sensation de présence

Afin d'éviter d'éventuels biais liés à des conflits d'introspection ou à une attention trop focalisée sur la tâche de mesure, certains auteurs de la littérature se penchent sur l'élaboration de méthodes consistant à observer les sujets.

Coehlo et al. [114] identifient trois types différents de méthodes objectives abordées :

- Les *mesures physiologiques*.
Pour mesurer la présence sociale, certains auteurs [126] cherchent à analyser l'utilisation de différents marqueurs physiologiques tels que la fréquence cardiaque, l'activité cérébrale, ou encore la conductance cutanée.
- Les *mesures par analyse de performances*.
S'appuyant sur le fait qu'une présence accrue permet une meilleure efficacité dans l'accomplissement d'une tâche, ainsi qu'un meilleur transfert de compétences, Coehlo et al. soulignent l'éventualité d'analyser les variations des performances des sujets pour mesurer la sensation de présence.
- Les *réponses posturales*.
Freeman et al. [127] explorent par exemple la possibilité d'analyser les différences comportementales dans la posture des sujets, afin de mesurer leur sensation de présence. Cette méthode se base sur le postulat que les sujets, se sentant présents dans l'environnement virtuel, vont inconsciemment répondre aux stimuli par des comportements conformes à ceux qu'ils adopteraient dans le monde réel.

1.3. Étude des cybermalaises

Certaines méthodes proposent de mesurer les cybermalaises depuis les retours provenant des sujets.

Kennedy et al. [109] ont par exemple proposé le *Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)*, un questionnaire fréquemment utilisé dans la littérature. À travers l'identification de 16 symptômes sur lesquels les utilisateurs doivent prononcer leur ressenti, il est destiné à évaluer le mal des simulateurs. Afin d'interpréter les résultats, Kennedy et al. proposent de regrouper les symptômes en 3 groupes :

- les symptômes *Nauséux* (N) : nausée, maux de ventre, salivation accrue, etc.
- les symptômes *Oculomoteurs* (O) : fatigue visuelle, difficulté de focalisation, vision floue, mi-graines, etc.
- les symptômes de *Désorientation* (D) : vertiges, étourdissements, etc.

Un score de sévérité totale (TS) et un score de sévérité pour chaque groupe de symptômes, sont ainsi calculés à partir de coefficients et de pondérations établis pour chacun des 16 symptômes³⁴.

Enfin, les auteurs fournissent les distributions, moyennes et écarts-type des scores issus d'un échantillon de référence comprenant plus de 1100 études³⁵.

2. Pertinence pédagogique de l'outil de formation

Afin d'analyser la pertinence pédagogique de l'outil de formation, il est nécessaire de s'intéresser aux ressentis et aux comportements des apprenants.

Pour ce faire, il est important de les mesurer sur des apprenants ayant utilisé l'outil (groupe de traitement), puis de les comparer à des mesures effectuées sur des apprenants ayant suivi la même formation via un autre moyen (groupe de contrôle).

Là encore, on peut recenser des méthodes subjectives et objectives.

2.1. Mesures subjectives pour évaluer la pertinence pédagogique

2.1.1. Motivation

Comme le souligne Sutcliffe [128], analyser la motivation de l'apprenant est un des facteurs clés permettant d'établir l'efficacité d'un outil d'apprentissage. La motivation est un phénomène complexe, mais elle peut avoir un impact sur la performance de la réalisation d'une tâche.

Au fil du temps, la notion de motivation a été largement et diversement étudiée. Un nombre important de théories ont été émises et reprises à son sujet.

Nous proposons d'aborder la notion de motivation selon la théorie de la motivation intrinsèque et extrinsèque émise par Deci et Ryan [129]. Ces auteurs structurent la motivation selon deux types :

- La *motivation intrinsèque*.

Motivation intrinsèque (Deci et Ryan [129]) :

Intérêt et plaisir qu'un individu trouve à effectuer une action, sans attente de récompense externe.

- La *motivation extrinsèque*.

Motivation extrinsèque (Deci et Ryan [129]) :

Inspiration qu'un individu trouve à effectuer une action, provoquée par un circonstance extérieure (récompense, sanction, approbation, etc.).

Différents auteurs relèvent des apports de motivation pour la Réalité Virtuelle en terme de motivation. Stone [130] mentionne par exemple que la Réalité Virtuelle améliore la motivation intrinsèque des apprenants. Il explique cet apport par les degrés de liberté qu'elle permet. L'auteur souligne aussi que la nature "haute-technologie" des interfaces sensorimotrices utilisées, peut amener un supplément de motivation intrinsèque.

34. La méthode calcul des scores SSQ est reproduite en Annexe 1

35. La distribution des scores de l'échantillon de référence est reproduite en Annexe 1

Afin de mesurer la motivation de l'apprenant, certains auteurs utilisent des méthodes de mesure subjectives, par le biais de questionnaires sur-mesure proposés aux sujets. Lors de l'étude de leur système d'entraînement à la prise de parole en public, Schneider et al. [45] ont par exemple intégré des items concernant la motivation, au sein des questionnaires distribués aux sujets.

Ces questionnaires sur-mesure proposent un nombre restreint de questions. Ils ont pour intérêt de ne pas surcharger les sujets. Notons toutefois que des travaux visant à établir échelles de mesure plus complètes existent dans la littérature, comme par exemple ceux de Vallerand et al. [131].

2.1.2. Confiance en soi

Une amélioration de la confiance en soi peut être un objectif visé par un système d'apprentissage en Réalité Virtuelle.

Lorsque c'est le cas, différentes méthodes d'évaluation subjectives sont possibles.

Pour la formation aux savoir-faire sociaux, certains auteurs proposent par exemple d'évaluer la confiance en soi des sujets, via le ressenti d'observateurs possédant un certain niveau d'expertise[41].

Certains travaux proposent aussi d'étudier la confiance en soi à partir de questionnaires directement proposés aux sujets.

Chollet et al. ont par exemple également souhaité analyser leur confiance en soi à partir d'un questionnaire d'analyse de l'anxiété à la prise de parole en public [132].

D'autres questionnaires de ce type existent. Nous retenons par exemple le questionnaire proposé par Hook et al. [133]. Ce questionnaire reprend et simplifie un questionnaire largement utilisé et retravaillé dans le domaine de la psychologie (*Personal Report and Confidence as Speaker (PRCS)*). Composé de 30 items, ce questionnaire vise également à analyser la confiance en soi pour la prise de parole en public.

Enfin, certains auteurs analysent des items liés à la confiance en soi, en les intégrant à des questionnaires plus élargis analysant l'outil d'apprentissage. Toujours pour la prise de parole en public, Schneider et al. [45] ont par exemple analysé la confiance en soi de leurs sujets, à partir de certains items créés spécifiquement et inclus dans les questionnaires remplis par les sujets à l'issue de leurs expérimentation.

2.1.3. Conscience de soi

En hypothétisant sur les apports de la sensation de présence, certains travaux cherchent à établir si la conscience de soi des apprenants n'est pas accrue en Réalité Virtuelle. Le postulat est que les apprenants, se sentant présents dans l'environnement virtuel, peuvent avoir une conscience plus importante de leurs actions et de leurs erreurs, ainsi que des conséquences qui en découlent.

Pour chercher à analyser ces effets, certains auteurs demandent par exemple à leurs sujets de s'auto-évaluer, notamment en estimant le nombre d'erreurs commises lors de leur passage sur l'outil [45]. Il est ensuite possible de comparer ce nombre estimé avec le nombre d'erreurs enregistrées par le système.

2.2. Mesures objectives pour évaluer la pertinence pédagogique

D'autres méthodes, plus objectives, sont envisageables.

Nous en identifions différents types :

— L'analyse de traces.

Effectuée de manière très courant dans le domaine de l'enseignement assisté par ordinateurs, de nombreux travaux cherchent à analyser les actions de l'apprenant au sein de systèmes d'apprentissage en Réalité Virtuelle.

Lors de travaux sur l'apprentissage de langues étrangères, Johnson et al. [134] ont par exemple permis à leur système de garder un enregistrement des exercices échoués et réussis par les apprenants au cours des différentes sessions. Ces informations ont ainsi pu être utilisées afin de déterminer quels types de feedback apportés aux apprenants étaient les plus appropriés.

Pour analyser l'efficacité de leur système d'entraînement à la prise de parole publique, Schneider et al. [45] enregistrent quant à eux la durée de chaque session, les différentes erreurs relevées, ainsi que le temps que l'apprenant a mis avant de les corriger.

Ces différentes méthodes permettent d'enregistrer les actions, les erreurs, ou encore les événements survenus dans l'environnement virtuel. À partir de ce type de données, il est possible d'effectuer des comparaisons avec un groupe de contrôle ayant utilisé un autre support de formation.

— Les analyses corporelles.

Certains travaux cherchent à analyser divers comportements corporels de l'apprenant en Réalité Virtuelle.

Pour l'apprentissage de savoir-faire sociaux par exemple, différents travaux analysent la gestuelle [40, 41, 44, 45], la posture [39, 44, 45], le regard [50], les émotions [135] et les expressions faciales [39, 40, 41] des apprenants.

Pour ce faire, certains auteurs utilisent des capteurs physiologiques. Hays et al. [135] cherchent notamment à analyser les émotions des apprenants à partir de capteurs mesurant la fréquence cardiaque et la conductance cutanée.

La plupart de ces travaux utilisent des interfaces de localisation corporelles (e.g. Microsoft Kinect, caméras, capteurs portés, etc.).

Un des intérêts supplémentaires de la Réalité Virtuelle provient donc de son caractère anthropocentré. Ces travaux montrent que l'utilisation des interfaces sensorimotrices, initialement destinées à percevoir et interagir avec l'environnement virtuel, peut par la même occasion être détournée afin de mesurer et d'enregistrer les comportements corporels de l'apprenant. Pour analyser la pertinence pédagogique de l'outil de formation, il peut là encore être possible de comparer ces données à celles issues d'un groupe de contrôle, étant intervenu sur un autre support que l'outil de formation en Réalité virtuelle.

— Les analyses vocales.

Enfin, lorsque l'apprenant est amené à interagir oralement, il faut noter que de nombreux travaux s'intéressent à l'analyse de son comportement verbal.

Si l'on prend à nouveau les cas d'usages de formation aux savoir-faire sociaux, certains travaux analysent différents éléments de la communication verbale de l'apprenant : les pauses phonétiques [40, 41, 45], le débit [40, 44], le ton [40], la syntaxe [40, 45, 49, 136], etc.

3. Tests et méthodologies statistiques

Comme nous venons de le voir, différentes méthodes permettent l'évaluation de la pertinence de l'outil de formation. La plupart d'entre elles nécessitent de comparer des données issues de deux groupes d'apprenants : ceux ayant utilisé l'outil et ceux ayant utilisé un autre support.

Lorsque des différences sont observées entre ces deux groupes de données, il est important de s'assurer qu'elles ne soient pas liées au hasard. Pour cela, le domaine des statistiques nous apporte des outils efficaces, permettant de s'assurer que les différences constatées sont suffisamment importantes pour garantir que nous n'observons pas un effet de hasard.

Après avoir rappelé les types de variables en statistiques, nous introduisons la notion de *valeur p* (*p-value*), utilisée afin de quantifier la significativité statistique des résultats des tests statistiques que nous proposons d'utiliser.

Nous décrivons ensuite une méthodologie utilisant ces tests, que nous appliquons dans le cadre de nos travaux. Pour cela, nous nous appuyons volontairement sur les tendances actuelles d'usage des outils statistiques, au sein des communautés de chercheurs en Réalité Virtuelle. Nous nous inspirons notamment de l'intervention d'Anne-Hélène Olivier³⁶, lors des Journées jeunes chercheurs du GDR IG-RV 2017³⁷ [137].

36. <https://sites.google.com/site/anneheleneolivier/>

37. Journées jeunes chercheurs du Groupement de Recherche en Informatique Graphique, Réalité Virtuelle et Visualisation, Rennes, Octobre 2017 (<https://igrv2017.sciencesconf.org/resource/page/id/9>)

TABLE 2.2: Exemples de variables qualitatives et quantitatives

Variables	Types		
Date	Quantitative	d'intervalle	discrète
Température			continue
Âge			discrète
Années d'expérience			
Nombre d'erreurs			
Distance			continue
Durée			
Surface			
Coefficient ou indice			
Pourcentage			
Métier	Qualitative	nominale	
Trouble visuel			
Symptôme			
Échelle de Likert		ordinaire	
Note		dichotomique	
Sexe			
Booléen			

Nous abordons dans un premier temps les méthodes utilisées, selon le contexte de mesure des données. Nous différencions ainsi la méthode utilisée, selon le type de variable analysée. Dans certains cas, une distinction peut être nécessaire en fonction de la provenance des données, selon si elles viennent de groupes différents que l'on cherche à comparer (échantillons indépendants), ou bien de mesures répétées sur un même groupe d'apprenants (échantillons dépendants).

3.1. Types de variables

Afin de pouvoir utiliser des tests statistiques de manière cohérente, il convient de différencier variables quantitatives et qualitatives.

— Variables quantitatives.

Variable quantitative :

Mesure de quantités, exprimant un ordre de grandeur (e.g. une distance, une fréquence, un âge, etc.).

Une variable quantitative est dite :

- discrète, si l'ensemble des valeurs qu'elle peut prendre est fini ou infini dénombrable.
- continue, si elle peut prendre une infinité de valeurs.
- d'intervalle (ou échelle d'intervalle), si l'intervalle entre deux valeurs possibles a toujours la même valeur ou la même signification.

Comme le montre la Table 2.2, illustrant différents types de variables rencontrés dans le cadre de nos travaux, les variables quantitatives peuvent être discrètes ou continues.

— Variables qualitatives (ou catégorielles).

Variable qualitative :

Expression d'une qualité, prenant pour valeurs des entités séparées en groupes distincts (catégories, niveaux, etc.).

Une variable qualitative est dite :

- nominale, lorsque ses valeurs correspondent à des catégories définies par un nom (e.g. Rouge/Vert/Bleu).
- ordinale, quand ses valeurs sont des catégories naturellement ordonnées (e.g. classement, échelle de Likert, etc.).
- dichotomique, si ses valeurs ne peuvent prendre que deux modalités (e.g. Oui/Non, Masculin/Féminin, Vrai/Faux, etc.).

Là encore, nous illustrons cette terminologie en Table 2.2.

3.2. Valeur p (p -value)

Comme nous l'avons mentionné précédemment, cette valeur est utilisée afin de quantifier la significativité de résultats issus de tests statistiques d'hypothèse nulle.

Un test à hypothèse nulle vise à rejeter ou non une hypothèse statistique.

Prenons l'exemple de deux groupes d'apprenants A et B , passés sur deux outils d'apprentissage différents. Nous voulons savoir si le nombre d'erreurs n_A , commis par le groupe A , est significativement différent du nombre d'erreurs n_B , commis par le groupe B . L'hypothèse nulle est donc la suivante : $H_0 : n_A = n_B$.

La valeur p représente le risque de rejeter à tort l'hypothèse H_0 , alors que celle-ci est vraie. Elle correspond à cette probabilité (P) de rejet à tort : $p = P(\text{rejet } H_0 \mid H_0 \text{ vraie})$.

Si cette valeur est inférieure à un certain seuil, alors on peut considérer que l'hypothèse de rejet de H_0 est statistiquement significative. Ce seuil est fréquemment fixé de sorte à admettre une probabilité de rejet à tort inférieure à 5%. Les tests statistiques sont donc généralement considérés comme significatifs lorsque $p < 0.05$.

3.3. Méthodologie

Afin de garantir que des différences observées entre deux groupes sont suffisamment importantes pour qu'elles ne soient pas dues à un effet de hasard, nous proposons d'utiliser différents tests statistiques en fonction du type des variables analysées.

Il convient d'utiliser un test statistique conformément à ses usages et à ses pré-conditions. Dans le cadre des travaux, nous différencions ainsi les tests statistiques effectués sur :

- les variables quantitatives (e.g. nombre d'erreurs, durée, surface, etc.) et les variables qualitatives ordinales (e.g. échelles, notes, etc.) ;
- les variables qualitatives nominales (e.g. métier, symptôme, etc.) et les variables dichotomiques (e.g. sexe, booléen, etc.).

3.3.1. Comparaison de variables quantitatives et qualitatives ordinales

Selon les caractéristiques de l'échantillon, il est nécessaire d'utiliser des tests statistiques différents. Ceux-ci peuvent différer selon si les données proviennent de deux groupes de sujets différents (échantillons indépendants), ou bien d'un seul et même groupe de sujets lors de répétitions (échantillons dépendants).

3.3.1.1. Méthodologie pour la comparaison d'échantillons indépendants

Lorsqu'il s'agit d'analyser des différences observées entre des groupes différents, nous proposons d'utiliser le test de Student [138] (*Student's t-test*).

Il permet de tester l'hypothèse selon laquelle les moyennes de deux groupes de données sont proches. Si cette hypothèse est rejetée, alors le test permet d'établir que la différence est trop importante pour qu'elle soit liée à une variation liée au hasard (on parle alors de différence statistiquement significative). Le test de Student est paramétrique, son utilisation présuppose que les données ont une distribution normale et que la variance des données est homogène.

Le test de Student compare les moyennes des deux groupes de données. Calculer une moyenne de variables qualitatives est discutable. Si dans certains domaines il est d'usage d'effectuer des moyennes sur des variables ordinales, cette pratique n'en est pas moins sujette à discussions (e.g. utilisation d'une moyenne de notes pour établir le niveau d'un étudiant).

Nous choisissons délibérément d'effectuer le test de Student sur des variables quantitatives seulement, en ajoutant une troisième condition d'application.

Si une de ces trois conditions n'est pas remplie, une solution consiste à utiliser un test de Wilcoxon-Mann-Whitney [139] (*Mann-Whitney U test*).

Il permet de tester l'hypothèse selon laquelle les médianes de chacun des deux groupes de données sont proches. Là encore, le test s'avère concluant si cette hypothèse est rejetée, permettant ainsi d'établir que la différence est statistiquement significative.

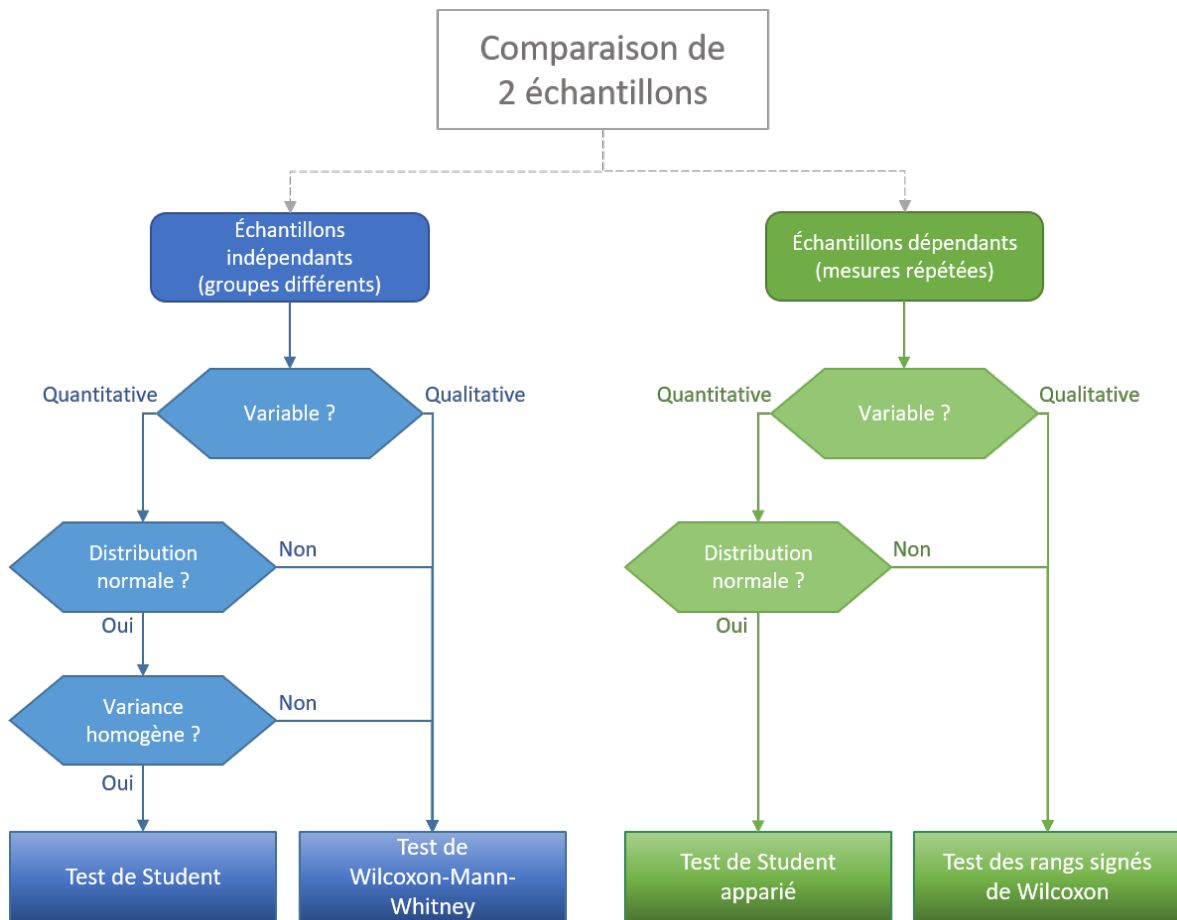


FIGURE 2.26: Méthodologie statistique utilisée pour la comparaison de variables quantitatives et qualitatives ordinales

À l'inverse du test de Student, le test de Wilcoxon-Mann-Whitney est non-paramétrique. Il fonctionne sur n'importe quelle distribution, ce qui fait de lui un test plus robuste mais moins puissant. Enfin, comme il consiste à analyser les médianes des deux groupes, il peut s'effectuer sur des variables qualitatives ordinales.

Ainsi, nous proposons d'appliquer la méthodologie résumée en Figure 2.26. Pour vérifier si les distributions suivent une loi normale, nous utilisons le test de Shapiro-Wilk [140]. En ce qui concerne l'homogénéité des variances, nous employons le test de Brown-Forsythe [141].

3.3.1.2. Méthodologie pour la comparaison d'échantillons dépendants (mesures répétées sur un même groupe)

Lors de mesures répétées au sein d'un même groupe, il est d'usage d'utiliser des tests appariés. Ces tests permettent d'analyser deux échantillons de données en comparant les données par paires. Nous proposons d'utiliser la version appariée du test de Student [138] (*paired Student's t-test*) pour les variables quantitatives. Pour celle-ci, seule la condition d'application d'une distribution normale est nécessaire.

Nous proposons d'appliquer également la méthodologie proposée en Figure 2.26.

Pour les données dont la distribution n'est pas normale ainsi que pour les variables qualitatives, nous utilisons le test des rangs signés de Wilcoxon [142] (*Wilcoxon signed-rank test*).

3.3.1.3. Taille de l'effet

Lorsqu'une différence significative est constatée, nous proposons de mesurer la taille (ou grandeur) de l'effet (r). En plus de renseigner sur l'amplitude de l'effet, cette mesure permet également les comparaisons inter-études.

En fonction des tests, plusieurs méthodes existent pour calculer la taille de l'effet.

Pour le test de Student et le test de Student apparié, nous la calculons à partir de la formule suivante [143] :

$$r = \sqrt{\frac{t^2}{(t^2 + df)}}$$

t : valeur t retournée par le test (rapport entre la variation inter-groupe et la variance intra-groupe)

df : degrés de liberté

Pour le test de Wilcoxon-Mann-Witney et le test des rangs signés de Wilcoxon, nous appliquons la formule [144] :

$$r = \frac{Z}{\sqrt{N}}$$

Z : z-score retourné par le test

N : nombre d'observations totales

Enfin, dans l'optique d'interpréter la grandeur de l'effet, nous avons choisi de nous référer aux indications de Cohen (d de Cohen) [143] :

- $r \approx 0.10$, effet faible ;
- $r \approx 0.30$, effet moyen ;
- $r \approx 0.50$, effet important.

3.3.2. Comparaison de variables qualitatives nominales et dichotomiques

Pour analyser des variables qualitatives nominales et dichotomiques, nous disposons de différents outils statistiques.

Dans le cadre de nos travaux, nous proposons d'utiliser le test d'indépendance de χ^2 et le test exact de Fisher.

3.3.2.4. Test d'indépendance de χ^2 [145]

Le test d'indépendance de χ^2 permet d'évaluer l'indépendance de deux variables à partir d'un tableau de contingence.

Un tableau de contingence est un tableau à double entrées où chaque cellule indique un décompte.

Prenons par exemple le cas d'une population interrogée sur son restaurant préféré. Nous souhaitons savoir si le choix du restaurant préféré varie en fonction du sexe de nos sujets. Nous voulons évaluer l'indépendance entre nos deux variables *Sexe* (dichotomique) et *Restaurant préféré* (qualitative nominale).

Dans notre exemple, le tableau de contingence est composé du nombre de choix pour un *Restaurant préféré*, selon notre échantillon d'hommes et de femmes. (Table 2.3).

Le test de χ^2 s'effectue en comparant le tableau de contingence à ses effectifs théoriques. Les effectifs théoriques de chaque effectif (cellule du tableau de contingence), sont calculés en multipliant les fréquences marginales de chaque catégorie (lignes et colonnes du tableau de contingence) à l'effectif total.

TABLE 2.3: Pour le choix d'un restaurant préféré, exemple d'un tableau de contingence, de ses fréquences et de ses effectifs théoriques

Tableau de contingence							
	Restaurant choisi						Totaux
	A	B	C	D	E	F	
Hommes	87	6	12	6	9	10	130
Femmes	51	9	10	14	20	3	107
Totaux	138	15	22	20	29	13	237 (Effectif total)

Fréquences							
	Restaurant choisi						Totaux
	A	B	C	D	E	F	
Hommes	36.71%	2.53%	5.06%	2.53%	3.80%	4.22%	54.85%
Femmes	21.52%	3.80%	4.22%	5.91%	8.44%	1.27%	45.15%
Totaux	58.23%	6.33%	9.28%	8.44%	12.24%	5.49%	100%

Effectifs théoriques							
	Restaurant choisi						Totaux
	A	B	C	D	E	F	
Hommes	75.70	8.23	12.07	10.97	15.91	7.13	130
Femmes	62.30	6.77	9.93	9.03	13.09	5.87	107
Totaux	138	15	22	20	29	13	237

En reprenant notre exemple (Table 2.3), l'effectif théorique des hommes ayant choisi le restaurant A (*Hommes-A*) s'exprime selon la formule :

$$\text{Fréquence d'hommes} \times \text{Fréquence de restaurants A} \times \text{Effectif total.}$$

Pour notre exemple, nous obtenons :

$$\text{Hommes-A} = 54.85\% \times 58.23\% \times 237 = 75.70$$

Le test consiste donc à regarder si on peut accepter l'hypothèse selon laquelle ces effectifs théoriques ne sont pas significativement différents des effectifs du tableau de contingence.

Sur notre exemple, il va permettre d'établir si on peut rejeter l'hypothèse qu'il y a une indépendance entre le choix du restaurant préféré et le sexe des sujets (pour $p \leq 0.05$).

Couramment utilisé pour effectuer un test d'indépendance entre deux variables qualitatives, le test de χ^2 comporte cependant certaines limites.

Plusieurs auteurs mentionnent la taille des effectifs théoriques comme une condition de validité du test. Pour nos travaux, nous suivons les préconisations de Cochran [146] : tous les effectifs théoriques doivent être non-nuls et au maximum 20% d'entre eux doivent être supérieurs ou égaux à 5. Notons cependant que d'autres auteurs fixent cet effectif théorique minimal à 10 [147].

Si ces conditions de validité ne sont pas remplies, il peut être intéressant de regrouper les données en créant des groupes d'effectifs de sorte à pouvoir appliquer le test.

3.3.2.5. Test exact de Fisher [148]

Une autre possibilité consiste à utiliser un test exact de Fisher.

Ce test permet de vérifier l'indépendance de deux variables qualitatives, en analysant les proportions de deux échantillons indépendants.

Ce test s'applique sur des tableaux de contingence 2x2 et s'applique sur de petits échantillons, sans contraintes d'effectif minimal.

En reprenant notre exemple du restaurant préféré, le regroupement de nos effectifs en deux groupes correspondant à leur position géographique (e.g. nord ou sud de la ville) nous permet d'utiliser le test exact de Fisher pour analyser si la localisation du choix de restaurant préféré varie en fonction du sexe des sujets.

Appliqué à ce tableau de contingence carré, le test exact de Fisher permet donc de rejeter l'hypothèse d'indépendance entre le sexe des sujets et le fait de choisir un restaurant au nord de la ville (pour $p \leq 0.05$).

4. Conclusions sur l'analyse de la pertinence d'un outil de formation en Réalité Virtuelle

Dans cette section, nous venons de présenter les différents outils à notre disposition afin d'analyser la pertinence d'un outil de formation en Réalité Virtuelle.

Nous avons identifié les différentes manières de s'assurer de la pertinence de conception de l'outil immersif.

Nous avons présenté des méthodes subjectives et objectives, permettant d'évaluer l'utilisabilité de l'outil, mesurer la sensation de présence et étudier les cybermalaises. L'analyse de ces différents marqueurs permet de valider que toutes les conditions sont requises afin de potentiellement favoriser l'apprentissage.

Nous avons ensuite relevé des méthodes afin d'analyser la pertinence pédagogique de l'outil de formation. Celles-ci permettent de vérifier si l'outil apporte une plus-value en terme d'apprentissage.

À partir de mesures subjectives, nous avons identifié différentes méthodes telles que l'analyse de la motivation des apprenants, de leur confiance en soi, ou encore de leur conscience de soi. Nous avons également souligné des méthodes objectives, permettant de tracer les actions de l'apprenant, analyser ses comportements verbaux et non-verbaux.

Afin de garantir que des différences observées sur des données recueillies à partir de ces différents outils, nous avons enfin présenté des méthodologies statistiques permettant de s'assurer qu'elles sont significatives. En tenant compte de la provenance des données et de leur type, nous sommes ainsi en mesure de garantir (ou non) leur significativité, lorsque nous analysons la pertinence d'un outil de formation en Réalité Virtuelle.

V Conclusions sur les fondements

Dans ce chapitre, nous avons donc dressé les fondements sur lesquels reposent nos travaux.

En essayant de dessiner un cadre terminologique propre à la formation, nous avons vu que ses définitions variaient en fonction des différents domaines. Nous avons cependant essayé d'établir des définitions, en proposant une représentation s'articulant autour des notions de connaissance et compétence.

Nous avons ensuite cherché à en faire de même pour la définition de Réalité Virtuelle, en prenant le parti de se positionner sur une définition centrée utilisateur. Comme les concepts fondamentaux peuvent être communs aux différentes technologies immersives, nous en avons également profité pour essayer de définir ces technologies selon le même point de vue.

De sorte à être en mesure de répondre aux questions de pertinence de conception d'un outil en Réalité Virtuelle, nous avons ensuite identifié différents concepts propres à la Réalité Virtuelle.

Nous avons tout d'abord relevé les interfaces utilisées en Réalité Virtuelle, via une typologie issue de la littérature, que nous réutilisons dans le cadre de nos travaux.

Nous avons ensuite évoqué la sensation de présence, un concept fondamental de la Réalité Virtuelle. Nous avons vu que celle-ci pouvait être un levier intéressant pour l'apprentissage.

Enfin, nous avons défini et identifié les cybermalaises, une des limites de cette technologie. Nous avons relevé que les incohérences sensorimotrices étaient à l'origine de ces effets, desquels il vaut mieux chercher à se prémunir si nous ne souhaitons pas exclure d'apprenants.

Nous venons d'identifier les différents outils pouvant être utilisés afin d'analyser la pertinence d'un outil de formation en Réalité Virtuelle.

Nous avons relevé des méthodes subjectives et objectives permettant d'analyser la pertinence de conception de l'outil immersif. En analysant l'utilisabilité de l'outil, en mesurant la sensation de présence dans l'environnement virtuel, ou encore en relevant la présence de cybermalaises, il est ainsi possible de vérifier que toutes les conditions sont potentiellement réunies afin de favoriser l'apprentissage.

Nous avons également identifié différentes méthodes permettant d'analyser la pertinence pédagogique de l'outil d'apprentissage, en vérifiant s'il apporte une plus-value d'apprentissage.

Enfin, nous avons proposé une méthodologie statistique permettant de garantir qu'une différence, observée sur les données provenant de ces outils de mesure, soit significative.

Dans les chapitre suivants, nous nous intéressons à différents cas d'usage.

Nous proposons des outils de formation en Réalité Virtuelle, en essayant de s'assurer d'une conception pertinente. Nous cherchons ainsi à respecter les différents concepts présentés dans ce chapitre. Nous essayons d'utiliser, entre autres, des interfaces sensorimotrices adaptées, de sorte à assurer une sensation de présence suffisante aux apprenants. Nous nous efforçons également de limiter au maximum les incohérences sensorimotrices, afin d'éviter de susciter des cybermalaises.

Nous expérimentons ensuite les solutions proposées sur des utilisateurs finaux, afin d'étudier leur pertinence. À cette occasion, nous appliquons la méthodologie statistique présentée afin de garantir que les différences observées sont significatives.

Contribution à l'apprentissage d'un savoir-faire procédural en Réalité Virtuelle

Dans ce chapitre, nous proposons de nous intéresser à l'utilisation de la Réalité Virtuelle pour l'apprentissage de savoir-faire procéduraux.

Nous venons de voir qu'ils correspondaient à des savoirs pour procéder, réaliser une tâche ou un acte précis. Les savoir-faire procéduraux vont ainsi consister à utiliser des capacités, afin de produire des comportements permettant d'appliquer des procédures nécessaires à la réalisation de la tâche.

Nous proposons d'étudier un cas d'usage identifié au cours de nos travaux : l'apprentissage de procédures techniques de maintenance militaire.

Nous présentons dans un premier temps le cas d'usage de formation à la calibration de la lunette infrarouge FÉLIN, ainsi que les problématiques qu'il soulève. Cette procédure est aujourd'hui enseignée par le biais de l'*EAO FÉLIN*, un logiciel mettant l'apprenant en situation d'effectuer le réglage. Nous analysons ensuite la littérature afin de voir si des solutions à ces problématiques y sont abordées.

Nous présentons donc ensuite le prototype qui a été développé, ainsi que les expérimentations que nous avons conduit afin d'en évaluer la pertinence.



FIGURE 3.1: Soldat équipé du système FÉLIN, avec la lunette IR fixée sur le fusil FAMAS

I Contexte et problématiques

1. Le système FÉLIN et sa lunette infrarouge (IR)

Les fantassins de l'Armée de Terre sont aujourd'hui équipés d'un système de combat appelé FÉLIN (*Fantassin à Équipement et Liaisons INTégrés*).

Développé par Safran Electronics Defense¹, il comprend notamment un fusil FAMAS modifié, auquel est associé un ensemble d'équipements vestimentaires, électroniques, optiques et optroniques.

Parmi ces dispositifs, figure la lunette infrarouge IR. Il s'agit d'une lunette de visée électronique, fixée au dessus du fusil FAMAS (Figure 3.1²). Elle a pour objectif d'apporter au fantassin une vision nocturne et décamouflée.

Lorsque le soldat regarde au travers de la lunette, il peut afficher une interface et naviguer au sein de différents menus. Afin de pouvoir interagir avec l'interface, il peut utiliser une télécommande fixée sur la poignée avant du fusil (Figure 3.1, main gauche). Il peut également se servir de boutons, positionnés sur les faces latérales de la lunette.

2. Calibration de la lunette IR FÉLIN

2.1. Procédure de calibration (ou "réglages tireur")

Afin de garantir le maintien en conditions opérationnelles de son arme, le fantassin se doit d'effectuer efficacement le réglage de sa lunette IR.

Cette procédure spécifique lui demande d'appliquer ses savoirs théoriques au sujet de la lunette, ainsi que des savoir-faire procéduraux consistant à suivre une procédure technique précise. La finalité de cette procédure vise à aligner l'axe de la lunette avec celui du canon de son arme. Elle amène notamment le fantassin à naviguer dans les menus de la lunette, tirer sur une cible et calculer des valeurs de correction.

1. <http://www.safran-electronics-defense.com/>

2. Source : <http://www.defense.gouv.fr/terre/equipements/materiels-generiques/equipement/felin-fantassin-a-equipement-et-liaisons-integres>

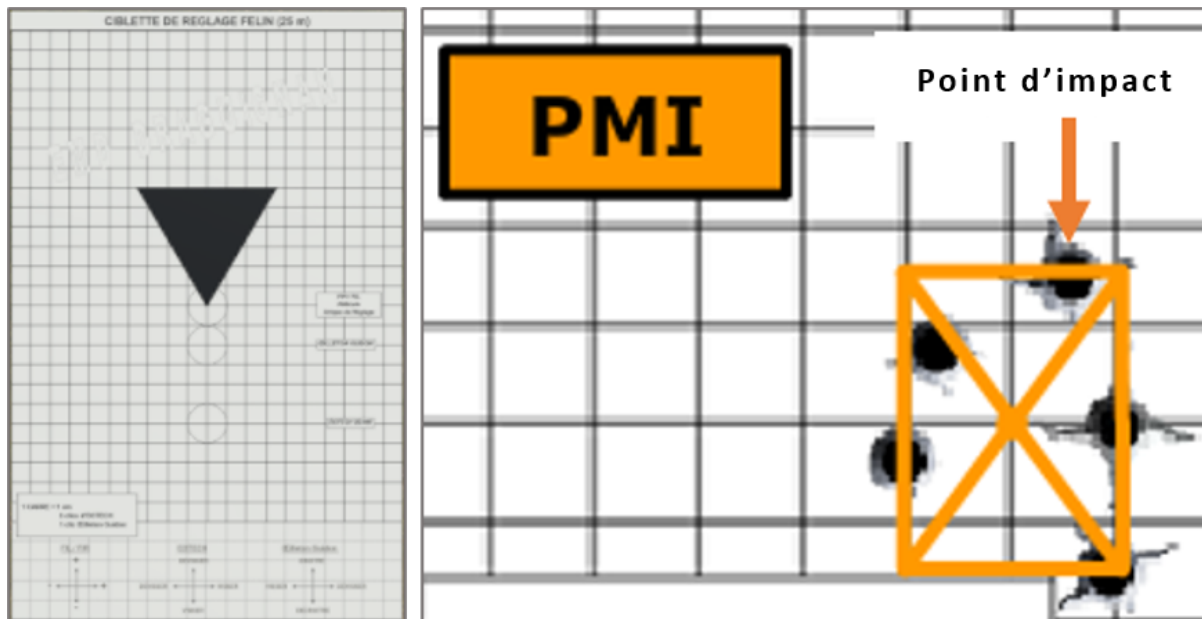


FIGURE 3.2: Cible utilisée pour la procédure de calibration (gauche) et Point Moyen d'Impact (PMI, droite)

Il effectue cette procédure spécifique sur un stand de tir :

1. En position de tir couché, il va tout d'abord naviguer au sein de l'interface, afin de démarrer la procédure.
2. Le soldat doit ensuite effectuer un tir de 5 cartouches sur une cible positionnée à 25 mètres (Figure 3.2, gauche).
3. Lorsqu'il en obtient l'autorisation, il se déplace ensuite sur la cible afin de constater les différences entre le point visé³ et le *Point Moyen d'Impact* (ou PMI). Ce point correspond à la position médiane dessinée à partir des cinq impacts de balle (Figure 3.2, droite).
Le soldat doit alors calculer la correction à apporter afin que le PMI corresponde au point visé. Il détermine cette correction sur deux dimensions :
 - la hauteur, i.e. le décalage vertical
 - la direction, i.e. le décalage horizontal
4. Le fantassin revient ensuite sur le pas de tir, en position de tir couché. Il utilise alors l'interface de la lunette afin d'entrer les valeurs de correction qu'il vient de calculer.
5. Il effectue alors un tir de 5 cartouches supplémentaires sur la cible.
6. À nouveau, il se rend sur la cible afin de vérifier que le PMI correspond bien au point visé. Si ce n'est pas le cas, il répète la procédure en calculant les nouvelles valeurs de correction, puis effectuant à nouveau un tir de 5 cartouche.
7. En revanche, si la position du PMI est correcte, il se rend sur le pas de tir et clôture la procédure en validant les valeurs de correction via l'interface.

2.2. Méthode d'apprentissage actuelle : l'EAO FÉLIN

L'apprentissage de cette procédure fait partie des premiers apprentissages du fantassin.

Aujourd'hui son apprentissage se fait dans un premier temps sous forme théorique, en salle de classe. Les apprenants sont ensuite amenés à répéter la procédure virtuellement, par le biais d'un logiciel développé et maintenu par Capgemini : l'EAO⁴ FÉLIN. Ce logiciel inclue en effet un module spécifique pour l'apprentissage de la procédure de réglages tireur de la lunette IR.

3. Le point visé correspond à la pointe basse du triangle dessiné sur la cible (Figure 3.2, gauche)

4. EAO : Enseignement Assisté par Ordinateur



FIGURE 3.3: EAO FÉLIN, module d'entraînement aux réglages tireurs de la lunette infrarouge

Les apprenants répètent la procédure en utilisant une interface WIMP⁵ en 2D. Celle-ci affiche une vue représentant la vision au travers de la lunette, pointée vers la cible. Elle est agrémentée de boutons représentant ceux de la lunette, ceux de la télécommande, ainsi que la gâchette du fusil (Figure 3.3).

Pour des raisons de sécurité, les apprenants répètent la procédure sur cette interface jusqu'à ne plus commettre aucune erreur. Lorsqu'ils y arrivent, ils obtiennent une certification leur permettant d'effectuer par la suite l'opération en situation réelle sur le stand de tir.

3. Problématiques identifiées

Lors de nos échanges avec les instructeurs de l'Armée de Terre, nous avons relevé certaines limites à la formation actuelle via l'EAO FÉLIN.

Les apprenants semblent nécessiter un nombre important de répétitions avant d'arriver à faire un sans-fautes.

Une fois certifiés, ils semblent aussi commettre de nombreuses erreurs et prendre un temps important en situation réelle.

Ces observations permettent de supposer certaines lacunes dans la méthode d'apprentissage actuelle, impactant potentiellement le transfert d'apprentissage.

Ces discussions ont permis d'émettre certaines pistes d'explications :

- Un manque potentiel d'implication des apprenants lors de l'utilisation du logiciel.
Les apprenants trouveraient peu de motivation dans la répétition de la procédure sur ce support. Son manque de fidélité peut notamment être en cause.
- Une répétition mécanique de la procédure lors des itérations.
Les apprenants semblent répéter machinalement la procédure, sans chercher à analyser leurs actions et leurs conséquences.

Pour répondre à ces problématiques, nous avons donc cherché à étudier si les technologies immersives pouvaient apporter des solutions.

5. WIMP (*Windows, Icons, Menus and Pointing device*) : interfaces graphiques basées sur l'utilisation de fenêtres, icônes, menus et pointeurs



FIGURE 3.4: Gavish et al. [31], formation aux procédures techniques de maintenance industrielle

Dans la section suivante, nous analysons succinctement la littérature, afin de relever d'éventuels apports pour la formation aux savoir-faire procéduraux technique.

Nous nous intéressons notamment à la maintenance technique et au domaine militaire.

Nous avons également souhaité établir si la fidélité de la mise en situation virtuelle pouvait influencer sur l'apprentissage des tâches.

II État de l'art

1. Apprentissage de savoir-faire procéduraux

Plusieurs travaux cherchent à utiliser la Réalité Virtuelle pour l'apprentissage de savoir-faire procéduraux techniques.

La formation aux techniques de chirurgie est par exemple souvent abordée dans la littérature.

Seymour et al. [149] ont notamment conçu et expérimenté un prototype permettant aux chirurgiens de s'entraîner à la laparoscopie. Au cours de leurs expérimentations, ils ont mesuré des améliorations dans la rapidité d'exécutions de la tâche, ainsi que dans le nombre d'erreurs commises.

Grantcharov et al. [65] ont produit des travaux similaires sur le même cas d'usage. Ils ont pu observer les mêmes améliorations en rapidité et en nombre d'erreurs commises. Ils ont aussi mesuré une amélioration dans la précision des gestes.

Gavish et al. [31] se sont quant à eux intéressés à l'apprentissage de procédures techniques, pour de la maintenance industrielle.

Ils ont conduit des expérimentations sur un prototype permettant de répéter les procédures en Réalité Virtuelle (Figure 3.4). Cependant, leurs expérimentations n'ont pas permis d'observer des apports sur le nombre d'erreurs commises. Les auteurs supposent que cet effet est lié au niveau d'expertise des sujets sollicités.

En revanche, ils ont noté que l'utilisation de la Réalité Virtuelle nécessitait un temps de formation accru.

Barnett et al. [150] rapportent des travaux sur l'apprentissage de procédures techniques de maintenance. Ces travaux se positionnent en revanche dans le domaine militaire, puisque les procédures concernent la maintenance d'appareil aériens militaires.

Pour celles-ci, ils ont comparé des méthodes d'apprentissage utilisant la Réalité Virtuelle, à une méthode utilisant des maquettes.

S'ils ont relevé des apports d'apprentissage similaires entre les deux méthodes, ils ont cependant aussi mesuré un temps de formation accru en Réalité Virtuelle, notamment lors de l'utilisation d'un visio-casque.



FIGURE 3.5: Clavarelli et al. [32], apprentissage des bonnes pratiques de tir



FIGURE 3.6: IMTS, outil industriel de formation à l'utilisation d'armes anti-aériennes pour les soldats américains

Dans la littérature, le domaine militaire fait état de nombreuses utilisations de la Réalité Virtuelle pour l'apprentissage. Macedonia [151] rapporte notamment différentes utilisations telles que l'apprentissage à la conduite d'engins militaires, le maniement des armes, la coordination stratégique, ou encore la gestion de situations critiques.

Enfin, certains auteurs s'intéressent à la formation aux habiletés de maniement de l'arme, en simulant un stand de tir.

Clavarelli et al. [152] explorent par exemple la Réalité Virtuelle pour l'apprentissage des bonnes pratiques de tir. Ils s'intéressent notamment à l'analyse de la posture de tir couché en projetant la scène sur un grand écran (Figure 3.5).

Rashid [35] a quant à lui exploré l'utilisation de la Réalité Virtuelle pour l'entraînement à l'utilisation d'armes anti-aériennes, en cherchant à utiliser des éléments sur étagère. L'auteur cite aussi des exemples de systèmes dans le domaine industriel, comme par exemple la solution IMTS⁶ à destination de l'armée américaine (Figure 3.6⁷).

2. Fidélité et interfaces haptiques passives

Les travaux de la littérature ont tendance à montrer que le niveau de fidélité d'une simulation a un impact sur l'efficacité d'apprentissage.

Allen et al. [33] ont par exemple cherché à analyser l'impact de la fidélité sur des simulateurs d'apprentissage à la conduite. Ils ont étudié les effets des niveaux de fidélité des simulateurs en Réalité Virtuelle, sur le transfert d'apprentissage (Figure 3.7).

6. Aegis Technologies

7. Source : <https://militarysimulation.training/air/modernize-system-modernize-training/>



FIGURE 3.7: Allen et al. [33], simulateurs d'apprentissage à la conduite selon différents niveaux de fidélité

Deux ans après que les sujets aient obtenu leur permis, les auteurs ont comparé leurs taux d'accidents avec ceux d'une population générale. Les résultats ont montré que plus une population de sujets avait appris sur un simulateur à haute fidélité, plus son taux d'accidents était faible.

Ces résultats permettent de supposer qu'une fidélité accrue du support d'apprentissage, permet d'en améliorer l'efficacité.

Les interfaces haptiques passives font partie des éléments permettant d'assurer la fidélité des simulateurs en Réalité Virtuelle.

Insko et al. [153] ont défini les interfaces haptiques passives de la manière suivante, que nous proposons de retenir.

Interfaces haptiques passives :

Ensemble de techniques incorporant des objets physiques passifs dans des environnements virtuels, afin de simuler physiquement des objets virtuels.

Nous avons précédemment vu qu'une sensation de présence accrue pouvait favoriser l'efficacité d'apprentissage. Certains travaux montrent que l'utilisation d'interfaces haptiques passives permet d'améliorer la sensation de présence.

Insko et al., que nous venons de citer, ont étudié la sensation de présence lors de l'utilisation d'interfaces haptiques passives. Les auteurs ont par exemple observé que les sujets adoptaient des comportements plus cohérents et efficaces dans l'environnement virtuel, lorsqu'ils utilisaient des interfaces haptiques passives.

Ces mêmes auteurs ont par la suite cherché à mesurer ces effets en utilisant des méthodes objectives (rythme cardiaque, conductance cutanée) et subjectives (*UCL Presence questionnaire* [34]). Ils ont ainsi conçu un prototype de scène virtuelle dans laquelle les sujets pouvaient se mouvoir au sein d'une pièce dont le plancher était troué (Figure 3.8, gauche). Les interfaces haptiques passives prenaient ainsi la forme de planches positionnées au niveau des rebords du plancher virtuel (Figure 3.8, droite). Leurs résultats ont alors montré que l'ajout d'interfaces haptiques passives avait amélioré la sensation de présence.

Néanmoins, l'utilisation d'interfaces haptiques passives comporte certaines limites.

Rashid [35] souligne en effet que des lacunes provenant de ces interfaces peuvent affecter la tâche qu'un opérateur doit accomplir.



FIGURE 3.8: Meehan et al. [34], étude de l'impact des interfaces haptiques passives (droite) sur la sensation de présence en environnement virtuel (gauche)



FIGURE 3.9: Rashid [35], étude de faisabilité de l'utilisation d'éléments sur étagère comme interfaces haptiques passives, pour la formation au maniement d'armes anti-aériennes

Comme nous l'avons précédemment mentionné, cet auteur a exploré l'utilisation de la Réalité Virtuelle pour la formation à l'utilisation d'armes anti-aériennes.

Afin de réaliser des interfaces haptiques passives pour ce cas d'usage (Figure 3.9), il a étudié la faisabilité de l'utilisation d'éléments "sur étagère" (i.e. non personnalisés et disponibles en l'état dans le commerce). L'auteur souligne notamment que le développement de simulateurs militaires sur-mesure implique des coûts importants.

3. Conclusions de l'état de l'art

Nous avons relevés plusieurs travaux concernant l'apprentissage de savoir-faire procéduraux en Réalité Virtuelle et/ou concernant le domaine militaire. Ceux-ci ont notamment permis de souligner des apports en terme d'apprentissage.

Si des travaux dans le domaine militaire existent, nous n'en avons cependant pas relevé concernant la formation aux procédures de réglages de l'armement. Dans la section suivante, nous présentons un prototype conçu pour couvrir ce cas d'usage. Nous communiquons ensuite les résultats des expérimentations que nous avons conduit afin d'en analyser la pertinence.

Certains travaux soulignent en contrepartie un accroissement du temps de formation lors de l'utilisation de la Réalité Virtuelle, notamment avec un visiocasque. Cet effet peut ainsi constituer une limite potentielle quant à la pertinence de l'utilisation de cette technologie.

Nous cherchons donc à analyser les temps de formation, afin de prendre en considération cette limite éventuelle.

Nous avons relevé que le niveau de fidélité pouvait avoir un impact sur l'efficacité d'apprentissage de savoir-faire procéduraux.

Nous avons notamment identifié la possibilité d'utiliser des interfaces haptiques passives, afin d'améliorer la fidélité d'un simulateur tout en évitant des problématiques de coûts.

Nous avons précédemment identifié les problématiques éventuelles du niveau de fidélité de l'EAO FÉLIN sur l'efficacité d'apprentissage. Dans le but de l'améliorer, nous cherchons à utiliser des interfaces haptiques passives en essayant d'utiliser, nous aussi, des éléments sur étagère.

III Le prototype FÉLIN VR

1. Principe

Nous avons donc conçu FÉLIN VR : un prototype en Réalité Virtuelle, destiné à répondre aux problématiques identifiées pour les formations actuelles aux réglages de la lunette IR.

L'objectif fut d'explorer des pistes d'amélioration pour la méthode actuelle basée sur l'EAO FÉLIN. Nous avons cherché à appliquer la procédure au plus proche de ce qu'elle est sur ce logiciel, tout améliorant la fidélité de la simulation.

Nous avons ainsi repris la procédure telle qu'elle est déployée sur le logiciel, en modifiant les interfaces sensorielles et motrices utilisées par les apprenants. Nous avons donc choisi de l'adapter à l'utilisation d'un visiocasque (Figure 3.10). Nous avons modélisé un stand de tir et une cible virtuelle, positionnée à 25 mètres. Les apprenants pouvaient ainsi prendre une posture de tir couché et se déplacer de la cible au pas de tir.

Afin d'améliorer la fidélité de la simulation, nous avons exploité les possibilités de l'utilisation du visiocasque, en étendant certaines étapes de la procédure de l'EAO FÉLIN.

Certaines d'entre-elles étaient facilitées ou réalisées de manière implicite dans le logiciel :

— *Prend la position de tir couché.*

Cette étape est logiquement absente sur l'EAO FÉLIN. Le visiocasque permet en revanche à l'apprenant de prendre cette posture. Nous avons donc inclus cette possibilité. L'objectif était de tendre vers une fidélité au plus proche des conditions réelles.

— *Tire 5 cartouches.*

Sur le logiciel EAO FÉLIN, l'apprenant n'avait qu'à cliquer une seule fois sur le bouton de la gâchette. Sur le prototype FÉLIN VR, nous avons permis à l'utilisateur de presser la gâchette cinq fois, chaque pression déclenchant un tir.

— *Se rend sur la cible.*

Après avoir tiré, le logiciel EAO zoome automatiquement sur la cible. Nous avons voulu étendre cette étape en permettant à l'apprenant de se téléporter à la cible.

— *Mesure le Point Moyen d'Impact (PMI).*

Sur l'EAO FÉLIN, le PMI et les corrections sont affichés sur la cible pendant les 5 secondes qui suivent le zoom sur celle-ci. Pour le prototype FÉLIN VR, nous avons choisi d'en faire de même (Figure 3.11), sans cependant restreindre sa durée d'affichage.

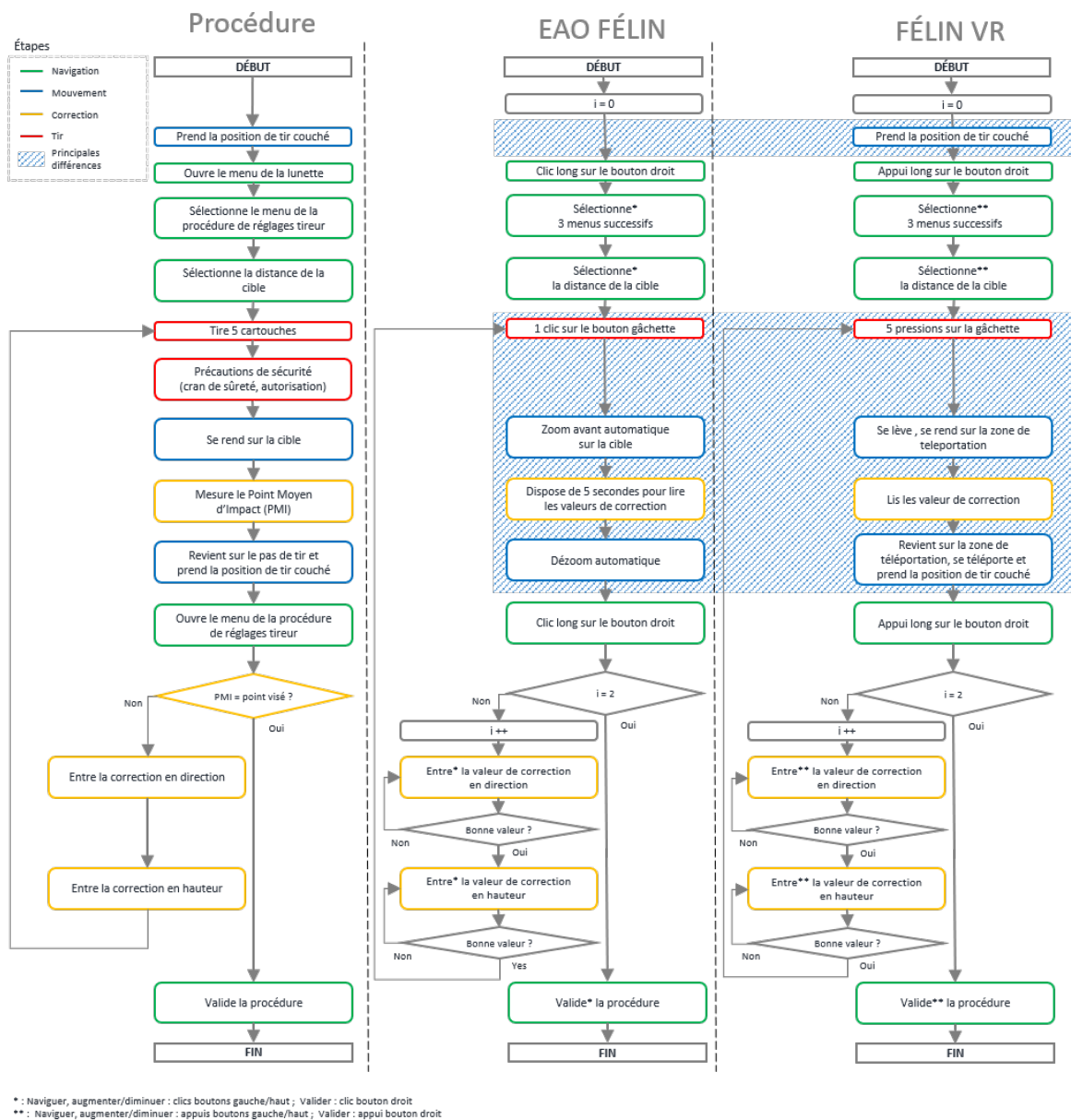


FIGURE 3.10: Procédure de réglages tireur de la lunette IR FÉLIN, et différences d'application entre l'EAO FÉLIN et le prototype FÉLIN VR

2. Implémentation

Le prototype a été développé en utilisant le moteur de jeu Unity⁸. Il est pensé pour utiliser un visiocasque HTC Vive et ses contrôleurs (Vive Controller).

L'environnement virtuel est affiché en stéréoscopie via le visiocasque. Lorsque l'apprenant positionne son oeil droit sur la bonnette de la lunette, une vue au travers de celle-ci s'affiche sur son oeil droit (Figure 3.12). Pour cela, une caméra a été positionnée en sortie de la lunette, avec un grossissement correspondant.

Nous avons cherché à améliorer la fidélité de la simulation en utilisant des interfaces haptiques passives. Nous avons ainsi souhaité utiliser des éléments sur étagère pour les interfaces haptiques passives du fusil et de la télécommande.

8. <https://unity3d.com/>

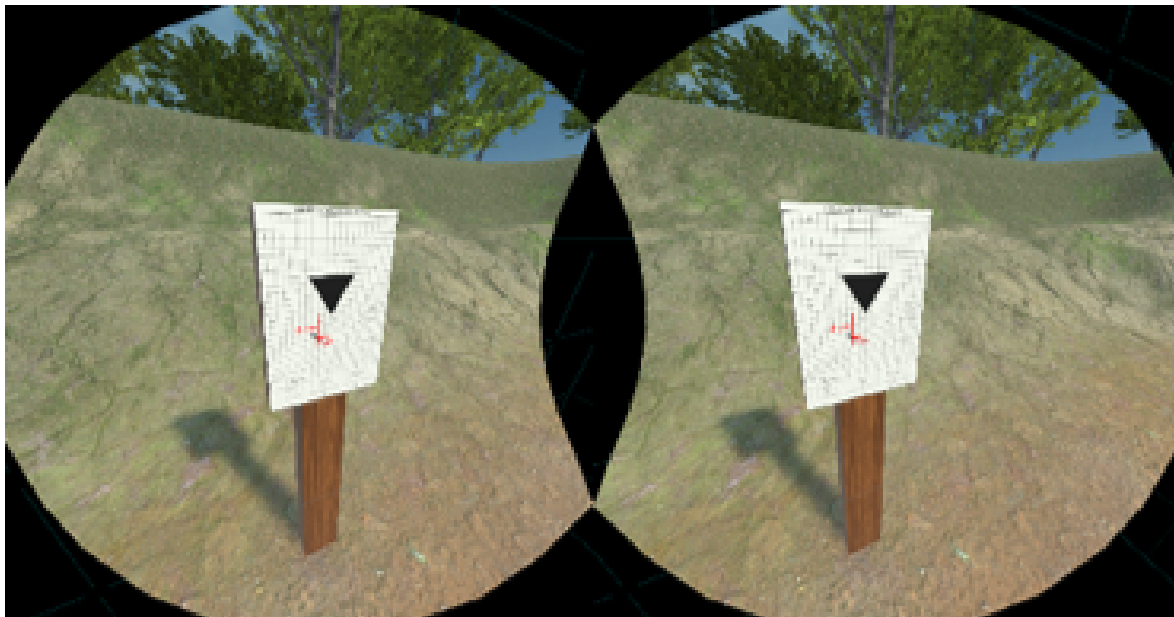


FIGURE 3.11: Cible modélisée avec PMI et corrections indiqués sur la cible (en rouge)

Nous avons utilisé un support de fusil issu du commerce⁹ pour les Vive Controllers. Il permet d'assembler les contrôleurs sur la structure, à partir de fixations aimantées. Nous avons ajusté leurs positions afin que chaque contrôleur ait la même position que les poignées du fusil FAMAS (Figure 3.13, gauche). Afin de permettre l'utilisation en position de tir couché, nous avons également ajouté un bipied obtenu dans le commerce¹⁰.

La gâchette du Vive Controller positionné à l'arrière fut assignée à celle du fusil. Le pavé tactile du contrôleur placé à l'avant fut quant à lui associé au fonctionnement de la télécommande. Afin de permettre à l'apprenant de trouver la position des différents boutons lors de l'utilisation du visiocasque, nous avons ajouté un masque adhésif sur ce pavé tactile (Figure 3.13, droite).

9. <https://www.etsy.com/fr/listing/491103695/htc-vive-magnetic-dual-controller-rifle>

10. <http://www.amazon.fr/gp/product/B00M9RF0ZM/>

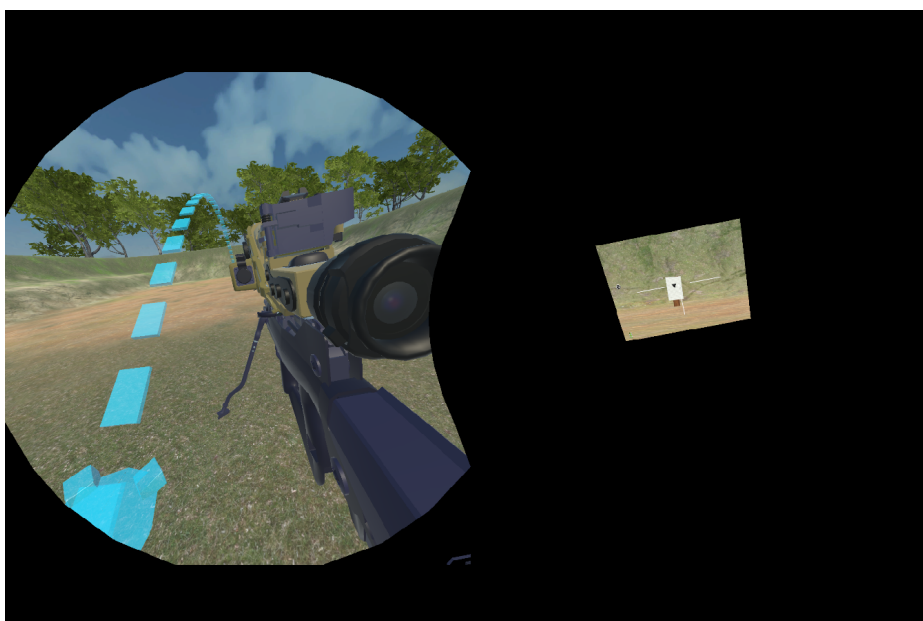


FIGURE 3.12: Affichage stéréoscopique avec la vue au travers de la lunette sur l'oeil droit



FIGURE 3.13: Support des contrôleurs et fusil FAMAS (gauche), masque adhésif ajouté au Vive Controller avant (droite)

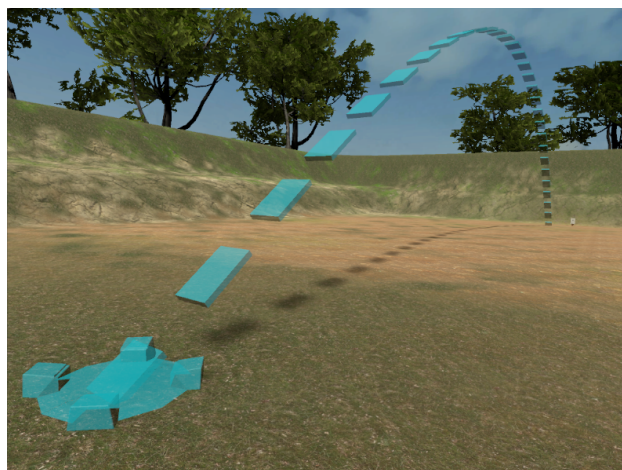


FIGURE 3.14: Zone de téléportation

Afin de permettre les déplacements vers la cible, nous avons souhaité utiliser une méthode de téléportation pour limiter au maximum d'éventuelles incohérences sensorimotrices liées au déplacement. L'utilisation d'interfaces motrices, de type plateformes directionnelles, n'aurait pas permis de prendre une position de tir couché. Nous avons ainsi placé une zone de téléportation sur le pas de tir (Figure 3.14). Lorsque l'apprenant entre dans cette zone, il est immédiatement téléporté au niveau de la cible. Il est ainsi en mesure de s'en approcher et d'observer les résultats de son tir. Pour retourner sur le pas de tir, une autre zone de téléportation similaire est alors disponible.

Afin de pouvoir comparer les deux supports de formation, nous avons appliqué au prototype les mêmes règles que celles présentes dans l'EAO FÉLIN.

Certaines actions inattendues n'étaient pas permises sur ce logiciel. Selon l'étape de la procédure, il n'était par exemple pas possible de naviguer dans les mauvais menus de l'interface, de tirer ou encore d'aller à la cible. Lorsque l'apprenant cherchait à effectuer une mauvaise action, le système le lui indiquait par le biais d'un signal sonore.

Nous avons donc appliqué les mêmes mécanismes sur le prototype FÉLIN VR. Sur les deux supports, toutes les actions et tous les temps d'utilisation furent tracés dans un fichier.

Nous y avons également répertorié les erreurs détectées.

Nous avons classé ces erreurs en trois types différents :

- Erreurs de procédure : l'apprenant a essayé d'aller dans un mauvais menu, ou effectué une action au mauvais moment (tir, mouvement vers la cible, etc.) ;
- Erreurs de correction : l'apprenant s'est trompé de valeur de correction, ou bien a inversé les corrections de hauteur et de direction ;
- Erreurs de boutons : l'apprenant a utilisé le mauvais bouton ou bien n'a pas appuyé sur un bouton aussi longtemps que nécessaire.

Du fait que la formation ne concerne pas l'entraînement au tir, les impacts de balle furent calculés aléatoirement pour chaque série de tir sur le prototype. La position de tir couché et l'habileté au tir n'étaient pas prises en compte ou analysées par le système.

IV Expérimentations

1. Objectifs

Nous avons expérimenté le prototype afin d'évaluer sa pertinence.

Nous avons ainsi comparé deux méthodes d'apprentissage :

- une méthode basée sur la méthode actuelle et utilisant le logiciel EAO FÉLIN ;
- une autre méthode à fidélité accrue, via l'utilisation du prototype FÉLIN VR.

1.1. Pertinence de conception

Nous souhaitons qualifier le prototype en analysant si les interactions avec les différents éléments étaient plaisantes et réalistes. Nous avons notamment voulu nous intéresser au fusil, à la lunette, à ses menus, ainsi qu'à la méthode de déplacement.

Nous avons souhaité vérifier si les apprenants n'étaient pas gênés par des cybermalaises.

Enfin, nous avons voulu voir si les ressentis des instructeurs correspondaient à celui des apprenants face au prototype. Comparer ces ressentis différents peut permettre d'identifier d'éventuelles lacunes, décelables par des utilisateurs expérimentés uniquement.

1.2. Pertinence pédagogique

Nous avons ensuite souhaité analyser la pertinence pédagogique de la méthode utilisant le prototype FÉLIN VR.

Nous avons ainsi formulé les hypothèses suivantes que nous désirions vérifier :

- H1** - Avec un niveau de fidélité accru, les apprenants commettraient moins d'erreurs lors de leur 1^{ère} procédure sur le prototype FÉLIN VR.
- H2** - Toujours dû à une meilleure fidélité, les apprenants auraient une meilleure conscience de leurs erreurs lors de l'utilisation du prototype FÉLIN VR.
- H3** - Les apprenants se sentiraient plus intrinsèquement motivés lorsqu'ils utilisent le prototype FÉLIN VR.
- H4** - Les apprenants auraient une meilleure confiance dans leur capacité à effectuer la procédure après avoir utilisé le prototype FÉLIN VR.
- H5** - Les apprenants effectueraient moins d'erreurs sur l'EAO FÉLIN après l'utilisation du prototype FÉLIN VR.
- H6** - Après avoir utilisé le prototype FÉLIN VR, les apprenants auraient besoin de moins d'itérations sur le logiciel EAO FÉLIN afin d'atteindre un sans-fautes.

Enfin, comme nous l'avons précédemment identifié lors de l'état de l'art, les temps de formation peuvent être augmentés lors de simulations utilisant un visiocasque. Nous avons souhaité analyser si cette limite était aussi présente, en analysant les temps de formation lors de l'utilisation des deux différents supports.

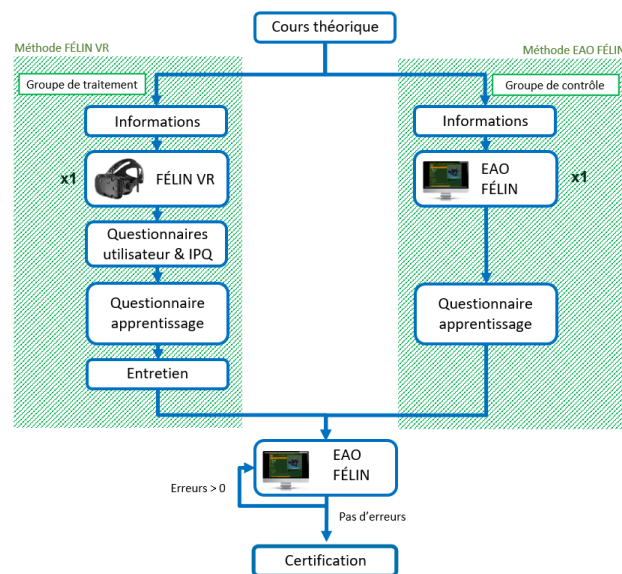


FIGURE 3.15: Processus expérimental pour les expérimentations du prototype FÉLIN VR

2. Processus expérimental

Afin de conduire ces expérimentations, nous avons appliqué le processus expérimental présenté en Figure 3.15.

Nous avons divisé nos sujets selon en deux groupes :

- Un groupe de traitement, sur la méthode utilisant le prototype FÉLIN VR.

Ce groupe effectua sa première itération sur le prototype, puis les itérations supplémentaires sur le logiciel EAO FÉLIN jusqu'à obtenir un sans-fautes.

Avant leur première itération, les sujets étaient brièvement informés sur l'expérimentation, ainsi que sur le fonctionnement du prototype.

Après leur premier passage, les apprenants remplissaient deux questionnaires :

- Un *Questionnaire utilisateur*¹¹.

Nous avons construit ce questionnaire (Likert) dans le but d'évaluer la pertinence de conception du prototype à partir du ressenti des sujets.

Il analysait ainsi leurs ressentis face aux différents éléments de la simulation : fusil, lunette, menus et méthode de déplacement.

Nous y avons également repris et inclus deux symptômes issus des questionnaires de cybermalaise SSQ : les nausées et la fatigue visuelle.

Afin de pouvoir comparer les résultats des sujets à ceux d'utilisateurs expérimentés, ce questionnaire fut aussi rempli par les instructeurs, lors de leur passage sur le prototype.

- Un questionnaire IPQ.

Nous avons choisi d'utiliser ce questionnaire, afin d'analyser si la sensation de présence dans l'environnement virtuel était convenable.

Là encore, ce questionnaire fut complété par les instructeurs lors de leur passage sur le prototype.

- Un questionnaire sur l'expérience d'apprentissage (*Questionnaire apprentissage*).

Nous avons construit ce questionnaire (Likert 1-5) afin de s'intéresser à différents marqueurs. Ceux-ci analysent la pertinence pédagogique.

11. Ce questionnaire est disponible en Annexe 2

Le questionnaire comporte des items permettant d'analyser le plaisir et l'intérêt des apprenants à effectuer la procédure, leur motivation intrinsèque à le refaire, leur confiance en leur capacité à la reproduire correctement, ainsi que les enseignements qu'ils pensent avoir tiré lors de cette première itération.

Il leur était également demandé d'estimer le nombre d'erreurs commises, afin de chercher à analyser si la conscience des erreurs différait en fonction du support.

Enfin, les sujets étaient invités à échanger librement sur l'expérience, au cours d'un entretien d'une durée de 5-10 minutes. Ces échanges débutaient tous par la même instruction, demandant aux sujets de communiquer tous les retours qu'ils jugeaient pertinents concernant l'expérience qu'ils venaient de vivre. Tous ces retours ont été notés afin de pouvoir être traités manuellement par la suite. Là encore, nous en avons fait de même avec les instructeurs.

Il est important de préciser que les sujets du groupe de traitement étaient isolés au cours de cette première phase de l'expérimentation. Ils n'étaient ainsi accompagnés que d'un instructeur et d'un expérimentateur.

L'objectif était d'éviter que les sujets suivants soient influencés par l'observation de leurs prédécesseurs.

- Un groupe de contrôle, affecté à la méthode utilisant le logiciel EAO FÉLIN.

Conformément à la méthode de formation traditionnelle, ce groupe réalisa la procédure sur le logiciel, jusqu'à obtenir un sans-fautes.

Avant leur première itération, quelques informations et quelques instructions concernant les expérimentations ont été fournies aux sujets. La consigne de veiller à éviter d'échanger entre eux au cours de l'expérimentation fut notamment transmise.

Après la première itération, il était demandé aux sujets de remplir le questionnaire sur l'expérience d'apprentissage.

Rassemblés dans une salle informatique, les sujets ont effectué la procédure sous la surveillance d'un instructeur. Celui-ci avait pour fonction de veiller au respect des consignes.

Après la première itération, les sujets des deux groupes furent invités à reproduire la procédure sur le logiciel EAO FÉLIN, jusqu'à atteindre un sans-faute.

Pour effectuer les itérations suivantes, les sujets étaient là encore réunis dans une salle informatique, sous la surveillance d'un instructeur.

Au sein d'un fichier, le logiciel traçait toujours les différentes actions, erreurs et temps d'utilisation des sujets sur les itérations supplémentaires.

3. Sujets

En collaboration avec Capgemini et la Direction des Ressources Humaines de l'Armée de Terre, nous avons conduit les expérimentations sur 76 apprenants lieutenants de l'école militaire de l'infanterie de Draguignan, lors de sessions de formation de l'école. De ce fait, nous avons dû faire face à des contraintes de temps et de logistique. Nous avons ainsi été en mesure d'assigner 22 apprenants seulement au groupe de traitement. Les 54 autres ont été attribués au groupe de contrôle. Cette répartition a été faite par les instructeurs, à qui nous avons demandé de sélectionner aléatoirement les sujets du groupe de traitement.

Le prototype FÉLIN VR a été conçu pour diffuser la vue de la lunette sur l'oeil droit uniquement. La seule restriction dans l'attribution des sujets concernait la sélection de sujets ayant l'oeil droit comme oeil directeur.

L'âge moyen des sujets était de 27(\pm 4) ans (28(\pm 7) ans pour le groupe de traitement, 24(\pm 6) pour le groupe de contrôle). Un seul sujet était de sexe féminin et il fut attribué au groupe de contrôle.

Dans le groupe de traitement, 74 % des sujets n'avait jamais utilisé de visiocasque auparavant.

Nous avons sollicité 6 instructeurs afin d'évaluer le prototype.

Ils étaient tous de sexe masculin et leur âge moyen était de $41(\pm 5)$ ans. 67% d'entre eux n'avait jamais utilisé de visiocasque avant le passage sur le prototype.

4. Résultats

4.1. Méthodologie

Nous cherchons à respecter les usages en calculant les moyennes arithmétiques des réponses aux classes d'items des différents questionnaires.

Certains items étaient volontairement tournés de manière négative¹², afin de chercher à obtenir un aperçu de la perception des sujets la plus fidèle possible. Pour ces items, nous avons donc inversé leur valeur sur l'échelle de Likert, en la soustrayant à la valeur maximale possible.

Conformément à l'usage qu'en font les auteurs, nous avons calculé les moyennes des réponses aux différents groupes d'items pour le questionnaire de présence IPQ.

Nous analysons ainsi les moyennes des items concernant la Présence spatiale, l'Engagement et le Réalisme ressenti. Nous étudions aussi la Présence générale, qui n'est concernée que par un seul item du questionnaire.

Lorsque nous avons observé une différence sur nos résultats, nous avons appliqué des tests statistiques conformément à la méthodologie que nous avons présenté au Chapitre 2.

Enfin, pour analyser la conscience des erreurs commises, nous avons mesuré l'écart entre le nombre d'erreurs tracées et celui indiqué par les sujets dans le *Questionnaire apprentissage*.

4.2. Résultats de la première itération

4.2.1. Pertinence de conception

4.2.1.1. Sensation de présence

Afin d'établir si les interfaces sensorimotrices utilisées et la conception de l'environnement virtuel sont pertinents, nous proposons d'analyser tout d'abord la sensation de présence. Nous avons vu précédemment qu'une sensation de présence suffisante était un pré-requis nécessaire à un outil de formation pertinent en Réalité Virtuelle.

La Figure 3.16 présente les réponses des sujets et des instructeurs au questionnaire de présence IPQ.

La Présence générale ($Médiane(Me) = 4.00$) et la Présence spatiale ($Me = 3.80$) semblent avoir été correctement évaluée par les sujets.

L'Engagement ($Me = 3.00$) et le Réalisme ressenti ($Me = 2.75$) l'ont été également, de manière plus modérée.

Les résultats des instructeurs semblent similaires à ceux des sujets, excepté pour le Réalisme ressenti. Les instructeurs semblent avoir ressenti un réalisme plus important.

Cependant, les tests statistiques n'ont pas permis d'établir cette différence comme significative (Wilcoxon-Mann-Whitney, $p > 0.05$).

Les résultats montrent que les sujets se sont senti convenablement présents de manière générale et spatiale. Les sujets ont correctement éprouvé de l'engagement et perçu du réalisme, de manière cependant plus modérée.

4.2.1.2. Questionnaires utilisateur

Toujours dans le but d'analyser la pertinence de conception du prototype, nous proposons d'analyser les réponses aux différents items du *Questionnaire utilisateur*. Nous avons analysé si l'utilisation des différents éléments avait été ressentie comme convenable. Nous avons étudié le ressenti des sujets concernant la méthode de déplacement et les cybermalaises.

12. Nous avons mentionné les items négatifs en annexe pour le *Questionnaire utilisateur* (Annexe 2) et le *Questionnaire apprentissage* (Annexe 3)

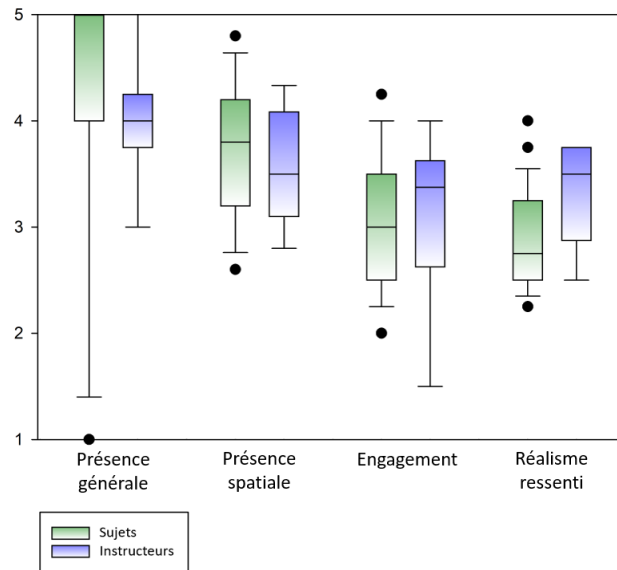


FIGURE 3.16: Résultats du questionnaire de présence IPQ

Nous avons aussi voulu analyser les réponses des sujets et des instructeurs aux items concernant les différents éléments du prototype (Figure 3.17).

Le fusil ($Me = 3.00$) et la télécommande ($Me = 3.25$) ont été modérément évalués.

Lorsqu'on analyse les résultats de chacun d'entre-eux (Table 3.1), on constate que le fusil semble avoir été perçu comme déplaisant à manipuler.

Pour la télécommande, les sujets semblent avoir éprouvé des difficultés à trouver les boutons. Cet effet semble les avoir affecté au point de rendre son utilisation déplaisante.

La lunette ($Me = 4.00$), les menus ($Me = 5.00$) et la méthode de déplacement ($Me = 5.00$) semblent avoir été évalués de manière satisfaisante.

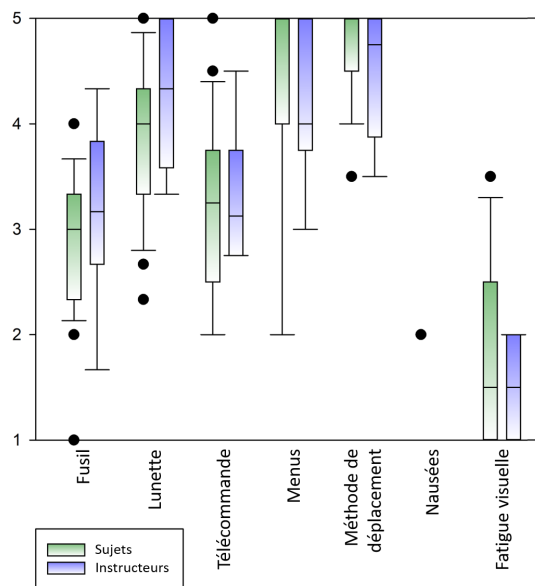


FIGURE 3.17: Résultats des *Questionnaires utilisateur*

TABLE 3.1: Résultats des items liés à l'évaluation du fusil et de la télécommande, dans le *Questionnaire utilisateur*

Rifle		
Questions (Likert [1-5])	Sujets (<i>Me</i>)	Instructeurs (<i>Me</i>)
1. Prise en main facile	3.00	4.00
2. Manipulation désagréable	3.00	3.50
3. Manipulation réaliste	3.00	3.50

Télécommande		
Questions (Likert [1-5])	Sujets (<i>Me</i>)	Instructeurs (<i>Me</i>)
7. Facilité pour trouver les boutons	2.00	2.50
8. Utilisation intuitive	3.00	4.00
9. Utilisation désagréable	2.00	3.00
10. Réalisme d'utilisation	3.00	4.00

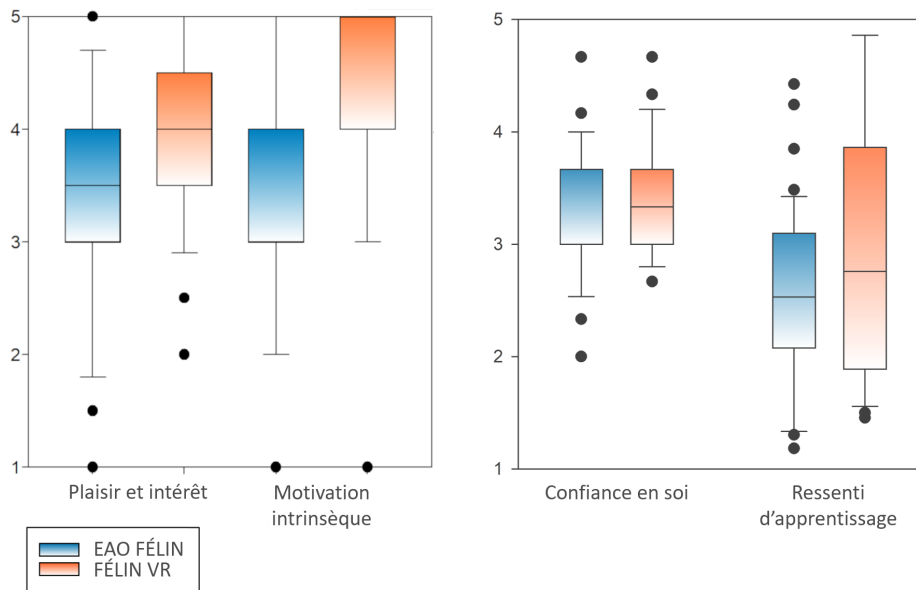


FIGURE 3.18: Résultats des *Questionnaires apprentissage*

Pour les symptômes liés aux cybermalaises, les sujets ne semblent pas avoir ressenti de nausées ($Me = 0.00$) mais une très légère fatigue visuelle ($Me = 0.50$).

Enfin, nous avons comparé les résultats des sujets et ceux des instructeurs. Ils sont similaires, excepté pour le fusil et la lunette qui semblent avoir été mieux évalués par les instructeurs. Cependant, les tests statistiques n'ont pas permis d'établir ces différences comme significatives (Wilcoxon-Mann-Whitney, $p > 0.05$).

Les résultats montrent donc des ressentis nuancés selon les différents éléments manipulés dans l'environnement virtuel. Néanmoins, la méthode de déplacement semble avoir été correctement évaluée. Les sujets ne semblent pas avoir ressenti de cybermalaises autres qu'une très légère fatigue visuelle pour certains d'entre eux.

4.2.2. Pertinence pédagogique

Afin d'analyser la pertinence pédagogique nous avons analysé les réponses du *Questionnaire apprentissage*. La Figure 3.18 montre les résultats obtenus .

Les résultats indiquent que les items correspondant au plaisir et à l'intérêt à effectuer la procédure, ont été mieux évalués pour les sujets ayant utilisé le prototype FÉLIN VR. Ils montrent le même effet pour l'item concernant la motivation intrinsèque à répéter la procédure.

TABLE 3.2: Résultats des tests statistiques (Wilcoxon-Mann-Whitney) pour les Questionnaires d'apprentissage

Item	Groupe	Médiane (<i>Me</i>)	Résultat du test	Différence	Taille de l'effet
Plaisir, intérêt	EAO FÉLIN	3.50	$U = 426.5, z = -2.59, p = 0.018$	Significative	$r = 0.29$
	FÉLIN VR	4.00			
Motivation intrinsèque	EAO FÉLIN	4.00	$U = 421.0, z = -2.65, p = 0.019$	Significative	$r = 0.30$
	FÉLIN VR	4.00			
Confiance en soi	EAO FÉLIN	3.00	$p > 0.05$	Non significative	
	FÉLIN VR	3.33			
Ressenti d'apprentissage	EAO FÉLIN	2.50	$p > 0.05$	Non significative	
	FÉLIN VR	2.66			

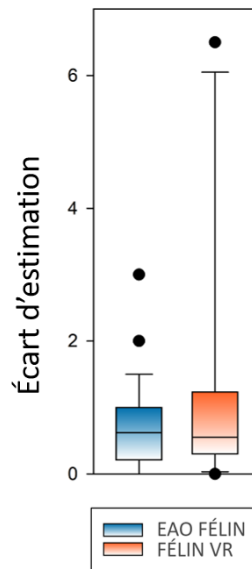


FIGURE 3.19: Écarts d'estimation des erreurs

Ces différences se sont avérées significatives lors des tests statistiques, avec des tailles d'effet moyennes (Table 3.2).

Pour l'estimation du nombre d'erreurs, les résultats d'1 sujet du groupe de traitement et de 4 sujets du groupe de contrôle n'ont pas été pris en compte. Ces derniers ont oublié de répondre à la question concernée dans le questionnaire.

À partir des résultats des autres sujets, nous avons calculé l'écart entre le nombre d'erreurs estimées et leur nombre réel. Les résultats semblent similaires entre les deux groupes (Figure 3.19). Seule la distribution des écarts semble plus importante pour les sujets passés sur le prototype FÉLIN VR.

Les résultats montrent donc une amélioration de la motivation intrinsèque des sujets. Les sujets ont notamment ressenti plus de plaisir et d'intérêt à effectuer la procédure sur le prototype.

En revanche, nous n'avons pas mesuré d'apports sur la conscience de soi. Les résultats ne montrent pas de différences dans l'écart avec l'estimation du nombre d'erreurs commises.

4.3. Résultats des répétitions

Nous avons souhaité analyser objectivement la pertinence pédagogique, en analysant le nombre d'erreurs commises et le nombre de répétitions nécessaires afin d'atteindre un sans-fautes.

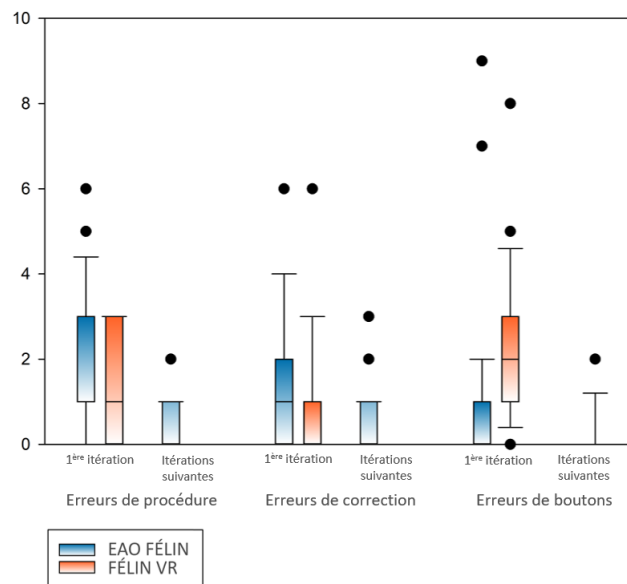


FIGURE 3.20: Nombre d'erreurs commises par les sujets

4.3.1. Échantillon

Pour traiter les résultats des itérations suivantes, nous avons été contraints d'exclure certains sujets.

Nous avons exclu 6 sujets du groupe de traitement. 4 d'entre eux n'ont pas eu le temps d'effectuer leurs itérations supplémentaires lors de la phase d'expérimentation. Les 2 autres sujets ont rencontré des problèmes techniques avec le logiciel EAO FÉLIN. Par précaution, nous avons préféré exclure leurs résultats.

Il faut souligner que deux sujets du groupe de traitement ont fait un sans-fautes lors de la première itération. Ils ont cependant effectué une itération supplémentaire sur le logiciel EAO FÉLIN, mais nous n'avons pas pris en compte leurs résultats lors de celle-ci.

14 sujets ont été exclus du groupe de contrôle. 11 d'entre eux ont fait face à des contraintes d'emploi du temps et n'ont pas eu le temps d'aller au bout de leurs itérations lors de la phase d'expérimentations. Lors des itérations supplémentaires, 2 autres sujets n'ont pas respecté les instructions et ont relancé le logiciel EAO FÉLIN dès qu'ils commettaient une erreur. Enfin, un dernier sujet a fait face à des problèmes techniques, pouvant avoir eu un impact sur ses résultats.

La population de sujets pour analyser les résultats issus des répétitions fut donc de 42 sujets : 16 sujets pour le groupe de traitement et 36 sujets pour le groupe de contrôle.

4.3.2. Erreurs commises

Nous avons seulement comparé les erreurs pouvant être commises sur les deux supports. Pour le groupe de traitement, nous avons rejeté des erreurs accidentelles, liées à des erreurs de manipulation (e.g. pression accidentelle d'un bouton lors de la saisie du fusil).

La Figure 3.20 montre le nombre d'erreurs, lors de la première procédure, puis lors des itérations suivantes.

Pour les *erreurs de procédure*, celles commises lors de la première procédure semblent légèrement moins nombreuses pour les sujets du groupe de traitement (FÉLIN VR). Cependant, ces résultats ne se sont pas montrés significatifs lors des tests statistiques (Table 3.4).

Les sujets des deux groupes semblent commettre moins d'erreurs lors de leurs itérations supplémentaires. Cette réduction s'est montrée statistiquement significative pour les deux groupes, avec des tailles de l'effet importantes (Table 3.3).

TABLE 3.3: Résultats des tests statistiques pour la diminution du nombre d'erreurs commises, entre la première procédure (#1) et les itérations suivantes (∞)

Erreurs	Groupe	Moyennes (\bar{x})	Test	Résultat du test	Différence	Taille de l'effet
Procédure	EAO FÉLIN	#1 : 1.63 (± 1.56) ∞ : 0.33 (± 0.62)	Wilcoxon rangs signés*	$W = 16.0, z = -4.258,$ $p < 0.01$	Significative	$r = 0.48$
	FÉLIN VR	#1 : 1.29 (± 1.21) ∞ : 0.00 (± 0.00)	Wilcoxon rangs signés*	$W = 0.0, z = -2.934,$ $p < 0.01$	Significative	$r = 0.52$
Correction	EAO FÉLIN	#1 : 1.00 (± 1.53) ∞ : 0.41 (± 0.72)	Wilcoxon rangs signés*	$W = 0.0, z = -2.175,$ $p < 0.01$	Significative	$r = 0.25$
	FÉLIN VR	#1 : 0.94 (± 1.64) ∞ : 0.00 (± 0.00)	Wilcoxon rangs signés*	$W = 0.0, z = -2.366,$ $p < 0.01$	Significative	$r = 0.42$
Boutons	EAO FÉLIN	#1 : 0.46 (± 1.45) ∞ : 0.00 (± 0.00)	Wilcoxon rangs signés*	$W = 0.0, z = -2.803,$ $p < 0.01$	Significative	$r = 0.32$
	FÉLIN VR	#1 : 2.53 (± 1.74) ∞ : 0.19 (± 0.53)	Wilcoxon rangs signés*	$W = 0.0, z = -3.413,$ $p < 0.01$	Significative	$r = 0.60$

* : Test de normalité échoué ($p < 0.05$)

TABLE 3.4: Résultats des tests statistiques pour la comparaison du nombre d'erreurs commises entre les deux groupes

Erreurs	Passage	Test	Résultat du test	Différence	Taille de l'effet
Procédure	1 ^{er} passage	Mann-Whitney*	$p > 0.05$	Non significative	
	Itérations	Mann-Whitney*	$p > 0.05$	Non significative	
Correction	1 ^{er} passage	Mann-Whitney*	$p > 0.05$	Non significative	
	Itérations	Mann-Whitney*	$p > 0.05$	Non significative	
Boutons	1 ^{er} passage	Mann-Whitney*	$U = 33.5, z = -5.152, p < 0.01$	Significative	$r = 0.69$
	Itérations	Mann-Whitney*	$U = 273.0, z = -5.152, p < 0.01$	Significative	$r = 0.69$

* : Test de normalité échoué ($p < 0.05$)

Cet effet semble d'autant plus marqué chez les sujets du groupe de traitement, pour lesquels nous ne recensons plus aucune erreur lors des itérations supplémentaires. Lors de celles-ci, le nombre d'erreurs du groupe de traitement semble inférieur à celui du groupe de contrôle (EAO FÉLIN). Cette différence ne s'est cependant pas montrée significative lors des tests statistiques (Table 3.4).

Les *erreurs de correction* montrent des effets similaires.

Lors de la première procédure, le nombre d'erreurs de correction du groupe de traitement semble inférieur. Néanmoins, ces différences ne se sont pas non plus montrées significatives lors des tests statistiques (Table 3.4).

Le nombre d'erreurs des deux groupes diminue après leur premier passage. Cette réduction s'est montrée significative pour les deux groupes, avec une taille de l'effet importante pour le groupe de traitement et moyenne pour le groupe de contrôle (Table 3.3).

Là encore, cet effet paraît plus marqué chez les sujets du groupe de traitement, qui ne commettent plus aucune erreur. Lors des itérations supplémentaires, le nombre d'erreurs commises semble inférieur pour le groupe de traitement, sans toutefois que les tests statistiques ne permettent d'établir que cette différence soit significative (Table 3.4).

Enfin, les *erreurs de boutons* indiquent des résultats contraires.

Les sujets du groupe de traitement ont en effet effectué plus d'erreurs de boutons lors de leur première procédure sur le prototype. Cette différence s'est montrée statistiquement significative, avec une taille de l'effet importante (Table 3.4).

Le nombre d'erreurs commises diminue pour les deux groupes après le premier passage. Cette réduction s'est montrée significative pour les deux groupes, avec des tailles de l'effet moyenne à importante (Table 3.3).

Pour ce type d'erreurs, la diminution semble plus marquée pour le groupe de contrôle. Ses sujets semblent en effet ne plus commettre aucune erreur, alors que ceux du groupe de traitement continue à en commettre. Cette différence s'est montrée significative, avec une taille de l'effet importante (Table 3.4).

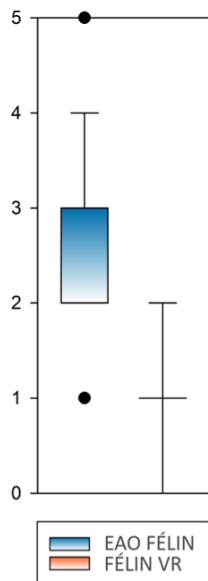


FIGURE 3.21: Nombre d'itérations supplémentaires nécessaires afin d'atteindre un sans-faute

Les résultats montrent donc que le nombre d'erreurs commises après le premier passage diminue pour les deux groupes. Ils semblent également indiquer qu'en fonction du type d'erreurs, les sujets du groupe FÉLIN VR vont commettre plus ou moins d'erreurs que l'autre groupe lors du premier passage, puis lors des itérations suivantes. Nous n'avons cependant pas été en mesure de confirmer que toutes ces différences observées soient statistiquement significatives.

4.3.3. Nombre de répétitions nécessaires

Le nombre de répétitions nécessaires afin d'atteindre un sans-fautes sont présentés en Figure 3.21.

Le nombre d'itérations nécessaires semble moins important pour les sujets du groupe de traitement. Cette différence s'est montrée statistiquement significative, avec une taille de l'effet importante (Test de normalité échoué ($p < 0.05$), Mann-Whitney : $U = 45.00$, $z = -5.62$, $p < 0.01$, $r = 0.67$).

Les résultats montrent donc que les sujets passés sur le prototype FÉLIN VR nécessitent moins d'itérations sur le logiciel EAO FÉLIN avant d'atteindre un sans-fautes.

4.4. Temps d'utilisation

Nous avons relevé les temps pris par les sujets pour effectuer la procédure, au cours des différentes itérations (Figure 3.22).

Lors de la première itération, le temps nécessaire est plus important pour les sujets du groupe de traitement (FÉLIN VR). Pour celui permettant d'atteindre un sans-fautes, les résultats semblent similaires entre les deux groupes. On observe cependant une distribution moins importante pour les sujets du groupe de traitement (Table 3.5). Enfin, le temps cumulé avant d'atteindre un sans-fautes est à nouveau plus important pour les sujets du groupe de traitement.

Les tests statistiques ont montré que les différences observées sont significatives pour la première itération, ainsi que pour le temps total nécessaire avant d'atteindre un sans-fautes (Table 3.5). Ces différences indiquent une taille de l'effet importante.

Les résultats montrent donc que les sujets mettent plus de temps sur le prototype FÉLIN VR, ainsi qu'avant d'atteindre un sans-fautes.

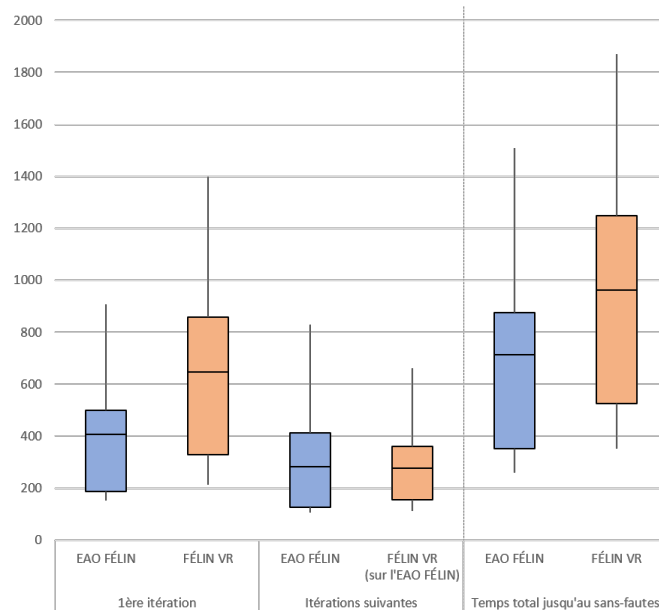


FIGURE 3.22: Temps passé sur la procédure, selon le support utilisé

TABLE 3.5: Résultats des tests statistiques (Student) pour les temps d'utilisation

Item	Groupe	Moyenne (\bar{x})	Résultat du test	Différence	Taille de l'effet
1 ^{ère} itération	EAO FÉLIN FÉLIN VR	261s ($\pm 82s$) 446s ($\pm 158s$)	Test de normalité échoué ($p < 0.05$), Wilcoxon-Mann-Whitney : $U = 159.0, z = -5.02, p < 0.01$	Significative	$r = 0.57$
Itérations suivantes	EAO FÉLIN FÉLIN VR	215s ($\pm 101s$) 195s ($\pm 77s$)	Test de normalité échoué ($p < 0.05$), Wilcoxon-Mann-Whitney : $p > 0.01$	Non significative	
Temps total	EAO FÉLIN FÉLIN VR	455s ($\pm 123s$) 613s ($\pm 155s$)	$t(15) = -4.02, p < 0.01$	Significative	$r = 0.72$

4.5. Discussions

4.5.1. Pertinence de conception

Afin d'évaluer la pertinence de conception du prototype, nous avons analysé la sensation de présence des sujets du groupe de contrôle.

Si la Présence générale et la Présence spatiale semblent avoir été correctement évaluées, l'Engagement et le Réalisme ressenti l'ont été de manière plus modérée.

Une piste d'explication semble avoir été apportée par les résultats du *Questionnaire utilisateur*.

Ceux-ci nous ont permis de souligner les lacunes des interfaces haptiques passives utilisés pour le fusil et la télécommande. Ces deux éléments ont été modérément évalués. Nous supposons qu'ils ont présenté des lacunes de fidélité ayant pu avoir impacté la sensation de présence.

Les entretiens tendent à confirmer cette hypothèse. Une part importante des sujets (65%) a librement indiqué avoir éprouvé des difficultés à trouver les boutons. La plupart d'entre eux ont également souligné qu'ils auraient souhaité pouvoir voir leurs mains afin de placer correctement leur pouce sur les boutons.

La fidélité du fusil a aussi été pointée du doigt. De nombreux sujets ont souligné avoir été dérangés par le fait que le fusil était trop léger (48%).

Un autre aspect fréquemment critiqué concerne les fixations magnétiques du support. Les fantassins contraignent fortement les poignées du fusil afin de le maintenir correctement en position de tir couché. Comme les fixations étaient aimantées, les sujets ont eu tendance à détacher légèrement les contrôleurs du support pendant la simulation.

Enfin, certains sujets ont mentionné avoir été gênés par le manque de fidélité de la gâchette du contrôleur (22%) et par l'absence de retour de l'arme sous l'impulsion du tir (13%).

TABLE 3.6: Résultats des hypothèses

Hypothèses		Résultats
H1	Moins d'erreurs sur la 1 ^{ère} procédure	Observations seulement
H2	Meilleure conscience des erreurs	Non validée
H3	Motivation intrinsèque accrue	Validée
H4	Meilleure confiance à réitérer la procédure	Non validée
H5	Moins d'erreurs lors des itération	Observations seulement
H6	Moins d'itérations nécessaires	Validée

La gâchette d'un fusil présente des résistances différentes au cours de la pression de tir et les sujets semblaient sensiblement attentif aux pressions exercées, nécessaires afin d'effectuer un tir correct.

Toutes ces différentes observations concernant la fidélité ont également été soulignées par les instructeurs au cours des entretiens.

Nous avons comparé les résultats de leurs réponses aux questionnaires, avec celles des sujets. Les instructeurs ont semblé avoir mieux évalué le fusil et la lunette. Ils ont aussi semblé exprimer un meilleur Réalisme ressenti sur les questionnaires de présence. Ces différences ne se sont cependant pas avérées suffisamment importantes pour garantir qu'elles ne soient pas liées à un effet de hasard.

Les sujets ont exprimé des opinions différentes concernant ces lacunes de fidélité.

Un bon nombre d'entre eux ont ressenti le besoin de "*retrouver des sensations réelles*" pendant l'expérience.

D'autres ont en revanche mentionné que ces lacunes permettaient d'être plus concentré sur la procédure.

La visibilité des menus a en revanche été bien évaluée. Il en est de même pour le fonctionnement de la lunette. Ces résultats viennent valider le choix de conception consistant à afficher le rendu de sa caméra sur l'oeil dominant du sujet, lorsque celui-ci s'en approche.

Enfin, les résultats des réponses concernant les cybermalaises semblent encourageants.

Les sujets ne semblent pas avoir ressenti de nausées. Nous expliquons ce résultat en le liant au fait que la méthode de déplacement a été bien évaluée. Ces résultats viennent confirmer qu'utiliser la méthode de téléportation permet de limiter les incohérences sensorimotrices.

De la fatigue visuelle a été faiblement ressentie, mais de manière légère par la moitié des sujets (55%). Pour l'expérimentation, nous avons demandé aux sujets de régler eux-même l'écart inter-pupillaire du visiocasque. Il est possible que ces réglages n'aient pas été optimaux et qu'ils aient généré cette fatigue. Il est également concevable qu'ils soient dûs aux conflits d'accommodation-vergence pouvant être soulevés lors de l'utilisation des visiocasques [154].

Des études supplémentaires seraient donc nécessaires pour établir l'origine de ces effets. Il serait alors important de déterminer s'ils ne sont pas nuisants, au point d'empêcher une utilisation satisfaisante pour une partie de la population d'apprenants.

4.5.2. Pertinence pédagogique

Les résultats des *Questionnaires apprentissage* et des passages des sujets ont permis de valider certaines des hypothèses que nous avons formulé (Table 3.6).

H1 - *Les sujets du groupe de traitement commettraient moins d'erreurs lors de leur 1^{ère} procédure.*

Nous avons observé que les sujets du groupe de traitement semblaient commettre moins d'erreurs de procédure et de correction lors de leur premier passage. Cependant, nous n'avons pas pu établir que cette différence soit statistiquement significative. Des études supplémentaires, sur un échantillon plus important seraient donc nécessaires afin de vérifier cette hypothèse.

Les erreurs de boutons se sont en revanche montrées significativement supérieures pour les sujets du groupe de traitement, avec une taille de l'effet importante. Nous supposons que ces erreurs sont liées aux problèmes de fidélité que nous venons d'identifier concernant la télécommande. Après avoir résolu ces lacunes, il serait donc nécessaire de vérifier la disparition de cet effet.

H2 - *Les sujets du groupe de traitement auraient une meilleure conscience de leurs erreurs lors de leur 1^{ère} procédure.*

L'analyse des écarts entre les erreurs estimées et les erreurs commises n'a pas permis de montrer de différences significatives sur la conscience de soi.

Nous observons seulement une dispersion plus importante pour les sujets du groupe de traitement. Nous supposons qu'elle soit également liée aux problèmes de fidélité des interfaces haptiques passives. Il peut donc être intéressant d'analyser si l'effet persiste une fois ces problèmes résolus.

Demander aux sujets d'estimer le nombre de leurs erreurs de chaque type peut également être une piste à explorer, afin d'analyser si un type d'erreur en particulier peut présenter des différences en fonction du support utilisé.

H3 - *Les sujets du groupe de traitement se sentiraient plus intrinsèquement motivés à réitérer la procédure.*

Les résultats ont montré que les sujets du groupe de traitement avaient significativement mieux évalué l'item correspondant à leur motivation intrinsèque pour réitérer la procédure. Ce résultat vient appuyer la supposition que vivre une procédure plus fidèle, peut améliorer la motivation intrinsèque des apprenants. Cependant, la taille de cet effet s'est avérée moyenne.

Pour confirmer cette hypothèse et clarifier la taille de son effet, il serait intéressant de conduire d'autres études, visant à analyser plus finement l'impact de la fidélité sur la motivation intrinsèque des apprenants.

H4 - *Les sujets du groupe de traitement auraient une meilleure confiance dans leur capacité à reproduire la procédure.*

Les résultats concernant la confiance des sujets en leur capacité à reproduire la procédure n'ont pas montré de différences significatives.

Nous supposons que cela puisse être lié à différents facteurs tels que la simplicité de la procédure, ou encore le niveau d'expérience des sujets. Des expérimentations supplémentaires, sur une population cible peu expérimentée, pourraient être nécessaires afin de vérifier à nouveau cette hypothèse. Il serait également judicieux de revoir la méthode visant à mesurer la confiance des apprenants, autrement que par les trois items que nous avons proposé dans le *Questionnaire apprentissage*.

H5 - *Les sujets du groupe de traitement effectueraient moins d'erreurs après leur 1^{ère} procédure.*

Les résultats ont montré que les sujets des deux groupes commettaient significativement moins d'erreurs après la première procédure.

Nous avons également observé que pour les erreurs de procédure et de correction, les sujets du groupe de traitement n'en commettaient plus aucune, alors que ceux du groupe de contrôle continuaient à le faire. Cependant, nous n'avons pas réussi à établir que ces différences du nombre d'erreurs lors des itérations supplémentaires étaient significatives.

Cette observation est cependant encourageante et permet d'appuyer l'hypothèse qu'améliorer la fidélité de l'EAO FÉLIN peut bénéficier à l'efficacité d'apprentissage. Des études supplémentaires, sur un échantillon plus large sont là aussi nécessaires afin de confirmer cette hypothèse.

Pour les erreurs de boutons, les résultats semblent indiquer l'effet inverse. Cependant, nous supposons que les problèmes de fidélité de la télécommande ont pu biaiser ces résultats. Il serait intéressant d'analyser à nouveau cet effet lorsque cette problématique aura été résolue.

H6 - *Les sujets du groupe de traitement auraient besoin de moins d'itérations supplémentaires afin d'atteindre un sans-fautes.*

Dans la continuité des observations sur les erreurs commises, nous avons constaté une amélioration significative du nombre d'itérations nécessaires pour le groupe de traitement, afin d'atteindre un sans-fautes.

Ces résultats viennent confirmer le fait que la méthode utilisant le prototype nécessite moins d'itérations pour atteindre le sans-fautes permettant une certification de l'apprenant.

Si nous venons de constater que la méthode utilisant le prototype améliorait la motivation intrinsèque et le nombre d'itérations nécessaires, les temps de passage nous amènent cependant à relativiser ces apports.

Lors de l'état de l'art, nous avons relevé que certains auteurs de la littérature indiquaient un temps de passage accru en Réalité Virtuelle. Nos résultats ont montré le même effet. La première procédure effectuée sur le prototype FÉLIN VR a pris significativement plus de temps que sur l'EAO FÉLIN. Les résultats montrent également que le nombre d'itérations gagnées ne permet pas d'amortir ce temps supplémentaire, car le temps total nécessaire afin d'atteindre un sans-fautes s'est aussi montré significativement supérieur.

De plus, nous n'avons pas comparé les temps d'équipement sur le prototype à ceux d'installation face au logiciel EAO FÉLIN. Il est donc tout à fait possible que cette différence soit accrue.

Enfin, les possibilités de parallélisation des procédures semblent bien plus limitées lors de l'utilisation du prototype. Les ressources humaines et matérielles mobilisées sont en effet plus importantes avec l'utilisation du visiocasque.

La pertinence du prototype sur l'efficacité d'apprentissage est donc à relativiser, selon l'importance que l'on accorde aux temps de formation.

Pour arbitrer cette ambivalence, il serait intéressant de conduire des études supplémentaires, visant à analyser l'impact de l'utilisation du prototype sur le transfert d'apprentissage. En mesurant le temps pris par les sujets pour faire leurs premières procédures en situation réelle sur le stand de tir, il peut alors être possible de constater des améliorations pour les sujets ayant utilisé le prototype.

4.5.3. Observations

Les expérimentations ont également permis de mettre en relief les limites du logiciel EAO FÉLIN. En effet, nous nous sommes aperçus que certaines erreurs commises sur le prototype étaient impossibles à réaliser sur le logiciel. Par exemple, certains sujets ont essayé de naviguer dans les menus au lieu de se déplacer à la cible après leur tir. Sur le logiciel, cette étape était automatisée, la cible zoomée apparaissant directement après le tir.

Nous ne nous attendions pas à constater cet effet. Il permet de souligner que l'utilisation d'un système plus fidèle en Réalité Virtuelle, peut aussi permettre d'analyser les comportements des apprenants afin d'identifier les limites des outils de formation traditionnels.

Une autre observation concerne l'application des sujets au respect des bonnes pratiques de tir pendant la procédure.

Les sujets du groupe de traitement avaient été sensibilisés au fait que les tirs étaient simulés aléatoirement et que l'habileté au tir n'était pas analysée. Or, nous avons observé que les sujets portaient malgré tout une attention importante à respecter ces pratiques. Ils s'appliquaient ainsi à viser correctement la cible, à couper leur respiration lors du tir, ou encore à contrôler la pression appliquée à la gâchette.

Nous interprétons cet effet comme lié à la sensation de présence apportée par le prototype et l'utilisation du visiocasque. Elle peut avoir inconsciemment amené les sujets à effectuer leur procédure de manière consciencieuse malgré tout.

Enfin, certains sujets ont mentionné d'eux même une "*sensation de calme*" lors de l'exécution de la procédure sur le prototype. Il peut être intéressant de se pencher sur les origines de cette sensation et sur ses effets lors de travaux futurs. Il est possible qu'elle puisse apporter des leviers intéressants à exploiter pour l'apprentissage en Réalité Virtuelle.

4.5.4. Limites

Nous identifions plusieurs limites à ces résultats.

La première concerne la simplicité de la procédure. La procédure de calibration de la lunette IR est assez simple. Nous supposons que certaines différences observées pourraient s'avérer significatives sur une procédure technique plus complexe.

La population des sujets constitue également une des limites de nos travaux.

Nous avons conduit nos expérimentations sur une population de lieutenants. Cela signifie qu'une partie d'entre-eux était récemment diplômés d'écoles d'officier et que l'autre partie avaient été promus en interne. Nous supposons que le niveau d'éducation des premiers peut avoir atténué certains résultats. Quant aux sujets promus, il est fort probable qu'ils avaient déjà accumulé de l'expérience sur l'équipement et/ou sur ce type de procédure technique de maintenance auparavant.

Lors de travaux futurs, il serait judicieux de mener des expérimentations sur des populations moins expérimentées.

5. Perspectives des travaux

Comme nous venons de le voir, les résultats des expérimentations ont permis de relever des perspectives afin d'améliorer la pertinence du prototype.

La fidélité des interfaces haptiques passives est notamment le principal axe d'amélioration à explorer lors de travaux futurs.

Une des possibilités d'amélioration peut par exemple consister à utiliser des équipements démilitarisés comme interfaces haptiques passives. Afin de permettre aux sujets de voir leur main, l'utilisation de gants connectés peut également être intéressante à explorer.

Il serait également nécessaire d'améliorer le prototype afin d'en permettre l'utilisation pour les apprenants ayant l'oeil gauche comme oeil directeur.

De nouvelles expérimentations seraient nécessaires une fois ces lacunes de fidélité résolues, afin de confirmer les effets constatés et vérifier à nouveau nos hypothèses.

Cela peut également être l'occasion de cibler une population moins expérimentée et de s'intéresser au transfert d'apprentissage.

Au vu de l'attention qu'accordent les apprenants à leurs différentes sensations, il serait intéressant de reproduire ces expérimentations afin d'identifier si l'amélioration de la fidélité des interfaces haptiques passives a un impact sur la sensation de présence, les comportements et l'efficacité d'apprentissage.

Afin de focaliser les apprenants sur l'apprentissage de la procédure uniquement, nous avons choisi de générer les impacts de balles aléatoirement, de restreindre la navigation dans les menus et d'afficher les valeurs de correction sur la cible. Nous nous sommes ainsi conformé aux mêmes degrés de liberté que ceux présents sur le logiciel EAO FÉLIN.

Il peut être intéressant d'implémenter une version plus fidèle du prototype, dans laquelle l'apprenant serait libre de se promener dans les menus.

L'impact de ses tirs peut également correspondre plus fidèlement aux décalages de son équipement et les corrections pourraient ne pas être indiquées.

Nous pourrions alors reproduire nos expérimentations, afin d'analyser si nous observons les mêmes résultats.

V Conclusions

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'utilisation de la Réalité Virtuelle pour la formation à un savoir-faire procédural.

Nous avons exploré ce type de savoirs au travers d'un cas d'usage de formation aux procédures techniques. Nous nous sommes intéressés à la formation à la procédure de calibration de la lunette infrarouge du fantassin FÉLIN.

Nous avons tout d'abord analysé la méthode actuelle de formation à cette procédure, puis identifié les problématiques qu'elle soulève.

Les instructeurs utilisent un logiciel WIMP et le soupçonnent d'apporter une implication limitée, ainsi qu'un manque de réflexion de la part des sujets. Une des pistes évoquées pour expliquer ces observations fut le manque de fidélité de ce logiciel.

Nous avons ensuite analysé la littérature, afin d'explorer des pistes pour répondre à ces problématiques. Nous avons notamment relevé que plusieurs travaux montraient des apports de l'utilisation de la Réalité Virtuelle, pour l'apprentissage de savoir-faire procéduraux.

V. CONCLUSIONS

Cette analyse nous a également permis d'identifier que l'utilisation de interfaces haptiques passives pouvait être une solution, afin d'améliorer la fidélité d'un simulateur. Nous avons aussi noté que l'utilisation de la Réalité Virtuelle pouvait amener des durées plus importantes de formation.

Nous avons ensuite proposé un prototype exploitant les possibilités offertes par l'utilisation d'un visio-casque et d'interfaces haptiques passives. Il permet notamment à l'apprenant d'effectuer la procédure sur un stand de tir virtuel.

Nous avons ensuite présenté les expérimentations que nous avons conduit pour évaluer la pertinence de ce prototype. Pour cela, nous avons proposé un processus expérimental comparant deux méthodes de formation : une utilisant le logiciel traditionnel, l'autre nécessitant l'utilisation consécutive des deux supports.

Les résultats ont permis d'identifier des lacunes de fidélité provenant des interfaces haptiques passives utilisés.

Malgré ces lacunes, les résultats ont aussi montré que les sujets avaient fait preuve de plus de motivation intrinsèque en utilisant le prototype. Ceux-ci ont également eu besoin de moins de répétitions de la procédure avant d'atteindre le sans-fautes nécessaire à leur certification.

Cependant, ces apports sont à relativiser, car nous avons constaté que l'exécution de la procédure nécessitait plus de temps sur le prototype.

Ces résultats sont donc encourageants, mais demandent des travaux et des études supplémentaires afin de garantir la pertinence du prototype élaboré.

Contribution à la formation aux compétences sociales en Réalité Virtuelle

Dans ce chapitre, nous proposons de nous intéresser à l'utilisation de la Réalité Virtuelle pour la formation aux compétences sociale.

Nous cherchons d'abord à établir une définition et une représentation pour les compétences sociales. Nous essayons ensuite d'identifier quelles sont les problématiques de formation qu'elles soulèvent, en identifiant deux cas d'usage.

Afin de répondre à ces problématiques, nous analysons ensuite la littérature afin de déterminer si des solutions y figurent.

Suite à cette analyse de la littérature, nous avons conçu un prototype d'outil de formation aux compétences sociales, sur lequel nous avons implémenté un scénario pour nos deux cas d'usage identifiés. Nous présentons ainsi le prototype, puis rapportons les expérimentations que nous avons effectuées afin d'analyser la pertinence de cette solution.

I Les compétences sociales

1. Définition des compétences sociales

Les définitions des compétences sociales varient d'un domaine de la littérature à l'autre. Ces variations proviennent notamment de différences inter-domaines dans la manière de définir la compétence.

En psychologie par exemple, nous avons souligné au Chapitre 2, que la compétence définit globalement une capacité ou une habileté. C'est pourquoi, certains auteurs, comme Juillet et Allilaire [155], auront tendance à parler de compétences sociales pour définir des aptitudes sociales.

En ce qui nous concerne, nous choisissons de reprendre puis étendre la définition des compétences sociales dans le domaine de la communication interpersonnelle.

Dans celui-ci, Wiemann [156] définit les compétences sociales comme étant *la capacité d'un acteur social à choisir parmi des comportements communicatifs disponibles, afin qu'il puisse avec succès accomplir ses propres buts interpersonnels pendant une rencontre, en maintenant le regard et la position de son pair.*

Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 2, la compétence d'une personne trouve sa substance dans ses aptitudes à produire des comportements spécifiques. Nous avons précisé qu'il était possible de différencier capacités et habiletés parmi ces aptitudes. À partir de la définition de Wieman, nous pouvons donc établir que les compétences sociales amènent une personne à utiliser des comportements à partir de ses aptitudes sociales, i.e. de capacités pouvant s'élever au rang d'habileté.

Cependant, en abordant la définition sous l'angle des communications interpersonnelles, Wiemann parle de "comportements communicatifs". Cette mention occulte certains comportements personnels non-communicatifs. Par exemple, la gestion des émotions dans un contexte d'interaction sociale nous semble être un savoir-être personnel non négligeable des compétences sociales.

Ce savoir-être se construit à partir d'aptitudes non-communicatives, comme par exemple, la conscience de soi (i.e. capacité de reconnaître et comprendre ses émotions, ses erreurs, etc.), ou encore la capacité de maîtrise de soi (i.e. capacité de contrôler et/ou rediriger ses pulsions, à suspendre le jugement).

Or, ces capacités mettent en jeu des comportements cognitifs, comme par exemple l'introspection ou l'intériorisation. Ces capacités sont certes personnelles, mais appliquées au contexte social, elles trouvent des spécificités et des mécanismes propres qui impacteront les comportements communicatifs mentionnés par Wiemann.

Comme toute compétence, les compétences sociales s'articulent également autour de savoirs théoriques et conceptuels. Par exemple, pour une communication en conférence, l'orateur va s'appuyer sur différents savoirs tels que les bonnes pratiques verbales et non-verbales à adopter pour cet exercice : utilisation du regard, posture à adopter, utilisation de l'espace, etc.

De ce fait, nous proposons d'étendre la définition de Wiemann en reprenant la définition de la compétence que nous avons précédemment établi. Nous proposons donc la définition suivante pour les compétences sociales.

Compétence sociale :

Mobilisation articulée de différents savoirs mettant à profit des aptitudes sociales, par le biais de comportements permettant d'atteindre efficacement des objectifs interpersonnels.

Pour reprendre notre exemple d'une communication face à un auditoire (e.g. conférence), l'orateur va ainsi structurer sa compétence (Figure 4.1) autour de :

- savoirs : e.g. conventions de présentations, bonnes pratiques de posture, d'utilisation du regard, d'occupation de l'espace... .

L'orateur acquiert ces savoirs par les cours, les lectures, et les formations lui énonçant ces concepts, de sorte à lui apporter la capacité de les ré-utiliser.

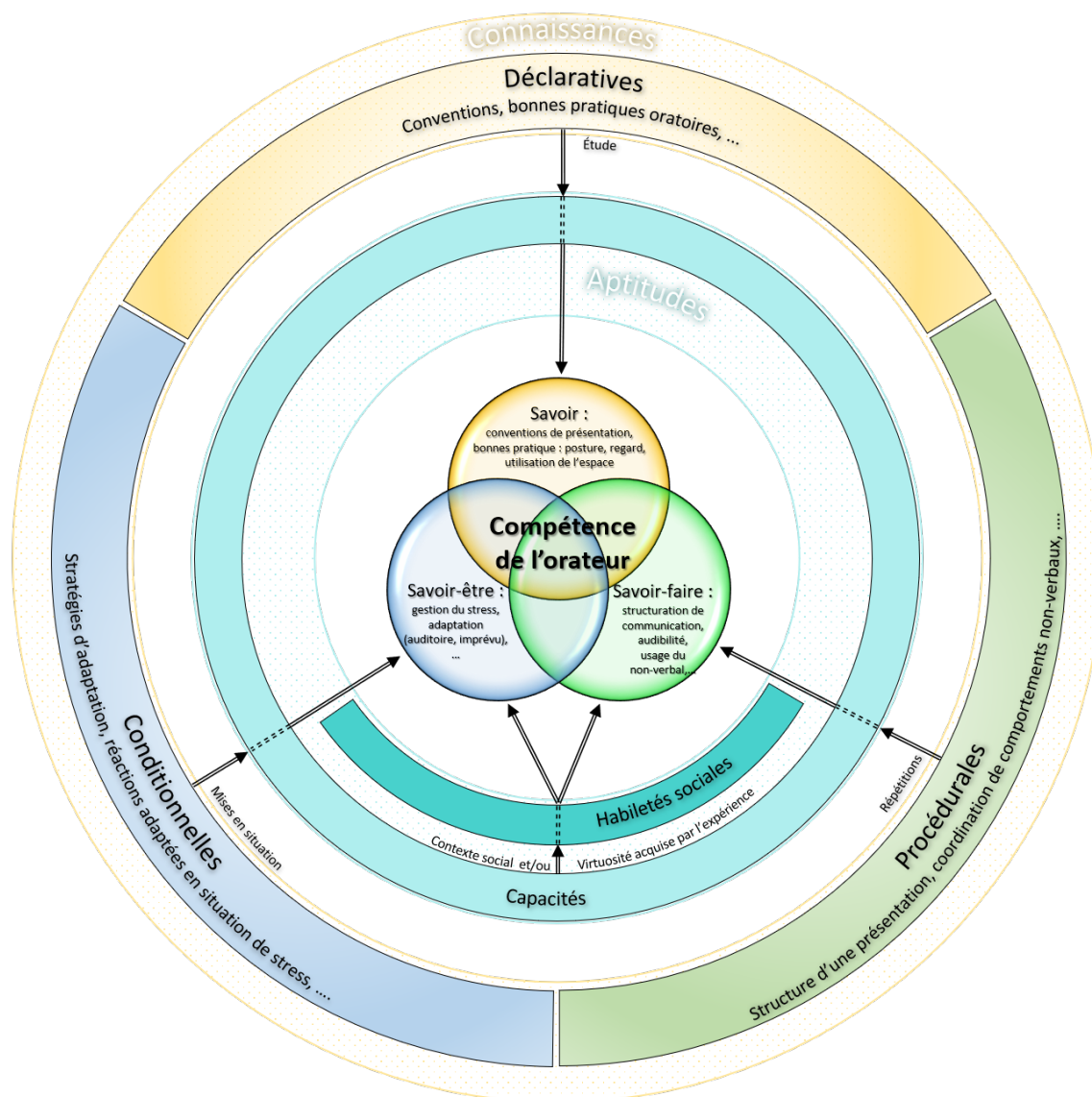


FIGURE 4.1: Exemple : représentation de la compétence sociale de l'orateur

— savoir-faire : e.g. structuration de la communication, audibilité des propos, utilisation de gestes d'illustration, etc.

En répétant son discours, il va tant développer ses capacités transverses de communication, que sa capacité à structurer ses communications.

— savoir-être : e.g. gestion du stress, adaptation à l'auditoire, gestion d'un évènement imprévu, etc.

Lorsqu'il effectue des mises en situation, qu'il s'agisse d'exercices ou de situations réelles, l'orateur va développer ces savoir-être.

Par exemple, la gestion de ses émotions se construira à partir de situations pouvant l'éprouver émotionnellement. Il pourra de construire potentiellement son savoir-être à partir de son analyse de la manière dont il a géré ces situations. Il peut aussi cheminer de manière similaire en vivant des mises en situation où un imprévu survient (e.g. problème du support de présentation, perturbation provenant de l'auditoire (téléphone, dissipation), etc.).

Enfin, en étant confronté à des auditoires de profils différents, il peut expérimenter des adaptations propres à ceux-ci (e.g. utilisation de références et d'illustrations parlantes) et les développer en fonction des succès de ces stratégies.

2. Les habiletés sociales

Les savoirs structurant les compétences sociales mettent donc à profit des capacités diversifiées d'une personne dans un contexte social donné. Les spécificités de ce contexte social tendent à élever ces capacités au rang d'habiletés, que nous nommons "habiletés sociales".

Pour définir les habiletés sociales, nous proposons de retenir la définition de Favrod et al. [157] dans le domaine de la psychiatrie. Ils décrivent les habiletés sociales comme suit.

Habiletés sociales (Favrod et al. [157]) :

Ensemble des capacités cognitives et comportementales permettant de communiquer des émotions et des besoins, de façon compétente afin d'atteindre des objectifs interpersonnels.

De plus, Favrod et al. décrivent un modèle séquentiel de traitement de l'information pour les habiletés sociales [158], conceptualisé en trois étapes successives :

- les habiletés "*réceptives*", permettant de percevoir précisément, puis d'interpréter correctement des indices environnementaux qui vont permettre de comprendre la situation sociale. Utilisant des capacités d'observation et de concentration, elles comprennent par exemple : l'identification du/des interlocuteurs appropriés, la focalisation de l'attention et l'écoute, la reconnaissance des émotions d'autrui et la perception des éléments environnementaux pouvant avoir un impact sur la situation.
- les habiletés "*décisionnelles*", consistant à déterminer la réponse la plus effective et appropriée pour la situation sociale. Afin de sélectionner les réponses optimales elles mettent à profit des capacités de projection, d'analyse et de décision. Ainsi, plusieurs capacités sont successivement mises à contribution :
 1. l'imagination et la prospection de réponses et de stratégies potentiellement efficaces,
 2. l'évaluation de chaque option en fonction de ses conséquences possibles,
 3. le choix de la meilleure réponse possible.
- les habiletés "*émettrices*", utilisées pour produire la réponse en utilisant des comportements directement observables. Parmi ces comportements, il est possible de différencier :
 - comportements *verbaux* : contenu verbal, volume de la voix et prosodie (ton, intonation, accent et rythme de la voix),etc.
 - comportements *non-verbaux* : utilisation du regard, posture, gestuelle, expressions faciales, occupation de l'espace,etc.

En suivant ce processus séquentiel (Figure 4.2), une personne va produire des comportements potentiellement efficaces à partir de ses habiletés sociales. Ces comportements deviennent ainsi une des manifestations de ses savoirs sociaux, et de fait, de sa compétence sociale.

Enfin, il est intéressant de noter que ce modèle séquentiel prédit qu'un déficit en amont du processus impacte les étapes suivantes. Ainsi, une perte ou un manque d'attention dans une conversation empêche la prise en compte de certains paramètres importants, ce qui affecte les décisions et les réponses comportementales d'une personne.

II Contexte et problématiques liés à la formation aux compétences sociales

Les compétences sociales sont largement utilisées dans de nombreux métiers. Nous nous intéressons à deux d'entre eux : les métiers managériaux et commerciaux.

En sélectionnant une compétence cible pour chacun d'entre eux, nous proposons d'en étudier les spécificités, ainsi que les problématiques que soulèvent leurs formations traditionnelles.

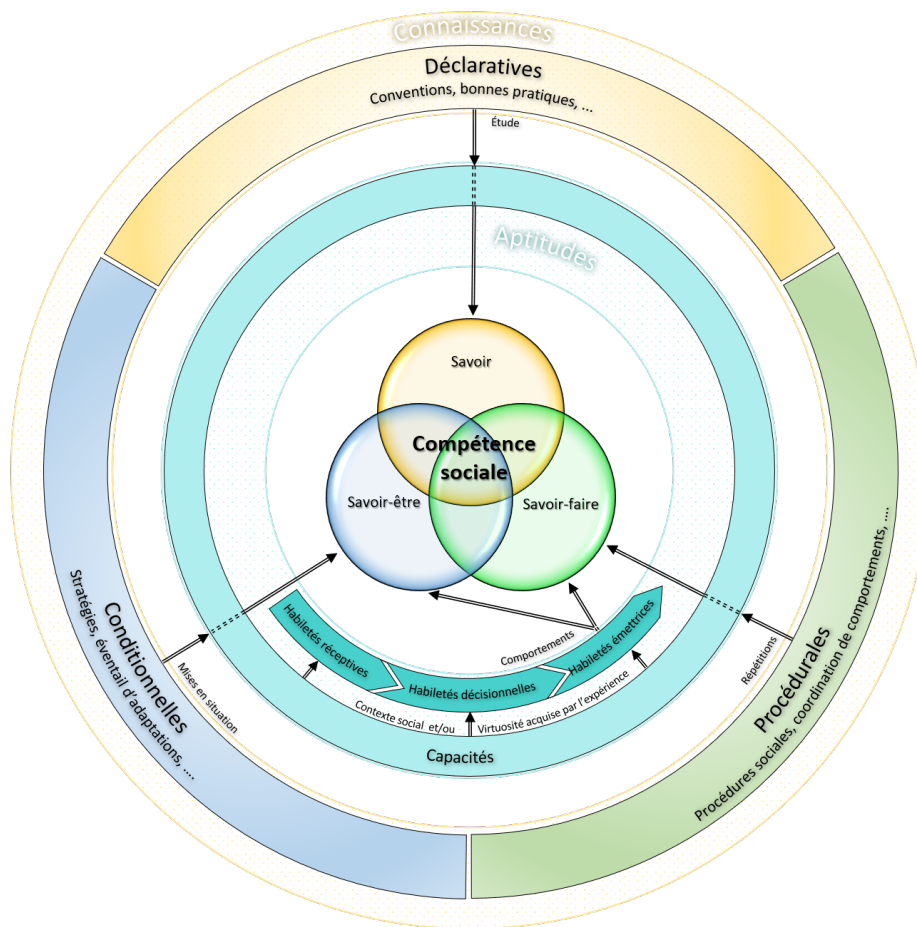


FIGURE 4.2: Représentation des compétences et des habiletés sociales

1. Compétence commerciale : la négociation client

En premier lieu, nous nous intéressons à la compétence en négociation client du commercial. Dans ces situations, il doit interagir avec le client, quel que soit son niveau de contentement.

Plus particulièrement, nous nous intéressons au développement de cette compétence dans des situations de mécontentement client à affronter.

Dans celles-ci, le commercial doit garder le contrôle de la relation client et maintenir ce lien. Il doit éviter de potentielles situations de rupture en répondant à la satisfaction de son client, sans s'opposer aux objectifs de son entreprise.

Nous proposons de voir cette compétence, comme s'articulant autour des différents savoirs que nous avons identifié (Figure 4.3) :

- des savoirs théoriques, propres aux spécificités du métier de commercial, à celles de son client, ainsi qu'aux bonnes pratiques de négociation et de communication.

Le commercial doit savoir utiliser ses connaissances déclaratives correspondant aux spécificités contractuelles, e.g. types de contrats, modalités d'application, limites, etc. Il doit également mettre à profit ses connaissances du client, afin d'être en mesure d'orienter avec pertinence sa recherche de solutions.

Enfin, le commercial cherchera à appliquer des connaissances propres à la communication et à la négociation, acquises au cours de formations théoriques.

- des savoir-faire sociaux, tant liés à la relation client, la négociation, qu'à la communication interpersonnelle.

Le commercial doit en effet respecter certaines règles sociales et interculturelles (savoirs procéduraux) lorsqu'il se présente face au client.

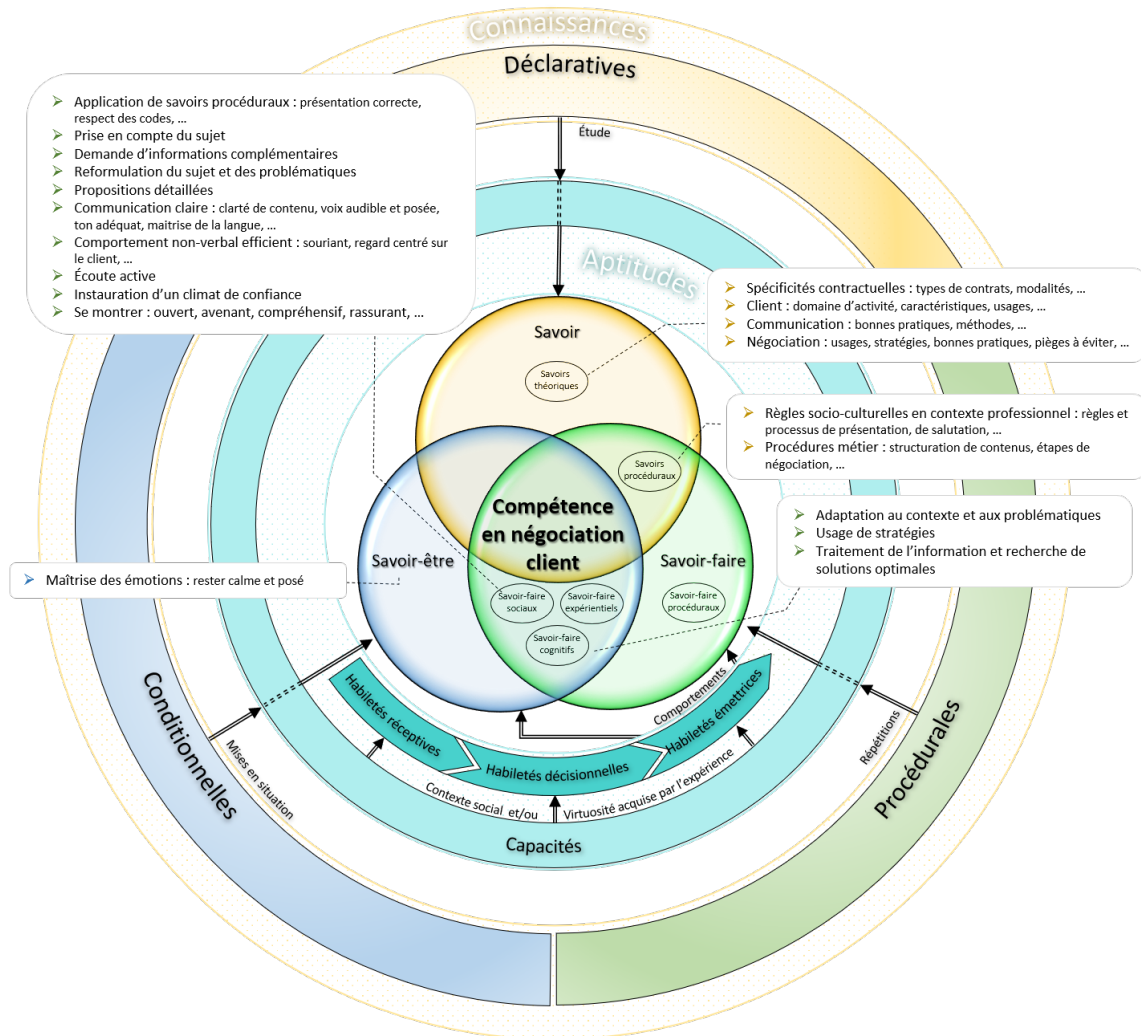


FIGURE 4.3: Représentation des savoirs identifiés du commercial, pour la compétence en négociation client

Par exemple, les codes de salutation varient d'une culture à une autre. Il doit donc appliquer des procédures sociales spécifiques correspondant au contexte socio-culturel.

Il doit aussi montrer au client qu'il a correctement pris en compte le sujet des échanges. Il est nécessaire qu'il demande des informations complémentaires lorsque nécessaire. Le commercial doit ensuite reformuler le sujet et les problématiques, de sorte à assurer la suite des échanges dans un climat propice à l'aboutissement de solutions.

Lorsqu'il propose ces solutions au client, il doit détailler suffisamment ses propositions, de sorte à lui fournir des informations claires. Elles doivent notamment comporter un plan d'action et des perspectives.

Outre la clarté de contenu de ses propos, le commercial doit exploiter ses habiletés émettrices de sorte à ce que sa voix soit audible et posée, son ton adéquat et sa maîtrise de la langue correcte. Sa communication non-verbale doit également être adaptée. Il doit centrer son regard sur le client, et se montrer souriant.

En combinant ses comportements non-verbaux à d'autres micro-compétences telles que l'empathie, le commercial doit également faire preuve d'écoute active. Il va ainsi montrer au client qu'il comprend ses problématiques et qu'il est tout à fait prompt à chercher une solution avec lui.

Enfin, il doit utiliser ses capacités d'adaptation, ainsi que ses habiletés cognitives et émettrices, afin de proposer des solutions dans un contexte favorable. Il doit combiner ces capacités en fonction de la situation, de sorte à instaurer un climat de confiance.

Il doit aussi se montrer avenant et ouvert. Enfin, il faut que le client trouve le commercial compréhensif et rassurant.

- des savoirs-faire cognitifs, liés à la recherche de solutions optimales.

En utilisant ses habiletés décisionnelles, le commercial va s'adapter au contexte et aux problématiques du client. Il va traiter l'information puis raisonner afin d'établir des stratégies et des solutions optimales, pouvant satisfaire les attentes du client sans toutefois nuire aux objectifs de son entreprise.

- des savoir-être personnels, liés à la gestion des émotions.

Le commercial doit se montrer calme et posé. Il doit faire preuve de confiance en soi et gérer efficacement son stress. Toutes ses attitudes doivent être mesurées, afin de conserver une maîtrise sur le climat des échanges.

2. Compétence managériale : la communication d'équipe

La communication d'équipe du manager représentent un autre cas d'usage, auquel nous proposons de nous intéresser.

Dans ces situations, un manager d'équipe va utiliser ses compétences sociales pour communiquer des informations à l'équipe placée sous sa responsabilité.

En ce qui nous concerne, nous choisissons de nous intéresser particulièrement aux situations de communications délicates. Dans celles-ci, le manager doit transmettre des informations, pouvant impacter émotionnellement l'équipe (e.g. modifications structurelles, arrivée/départ de collaborateurs, cessation d'activité, montées en charge, etc.).

Au cours de cette situation, le manager doit être moteur de la communication. Il doit transmettre les informations avec tact et s'adapter aux différentes réactions de son auditoire, afin de conserver un climat de travail sain dans son équipe.

Là encore, nous proposons de voir la compétence du manager pour les communications d'équipe, comme une articulation de différents savoirs, tel que nous les avons identifié (Figure 4.4) :

- Des savoirs correspondant aux principes fondamentaux du management et de la communication.

À l'instar du commercial, le manager doit s'appuyer sur des savoirs théoriques et procéduraux issus des connaissances théoriques de son domaine. Il va réutiliser des connaissances déclaratives, i.e. des principes et des méthodes liés au métier de manager, ainsi qu'à l'exercice de communication. Il a à sa disposition différents savoirs tels que les manières de structurer ce type de communication (savoirs procéduraux), ou encore les attitudes à éviter (savoirs théoriques).

Le manager va également faire appel à des savoirs propres à la communication face à un auditoire. Il s'agit là de principes et de bonnes pratiques transverses, définissant les moyens nécessaires pour communiquer efficacement face à un auditoire (e.g. comportements verbaux et non-verbaux à adopter).

- Des savoir-faire sociaux, tant propres à la communication de manière générale, qu'à la communication d'équipe.

Le manager doit utiliser ses habiletés émettrices pour que la communication soit efficace. Il doit contrôler son comportement non-verbal en centrant son regard sur l'assistance, en optant pour des postures et des gestuelles correctes, ainsi qu'en occupant intelligemment l'espace dont il dispose. Son comportement verbal doit également être efficace. Sa voix doit être audible et posée, le ton utilisé doit être adéquat, et le rythme de parole doit être fluide et assuré. Enfin, le contenu de ses propos doit être clair et compréhensible par l'équipe.

Comme pour le commercial, le manager doit faire preuve d'écoute active. Il est nécessaire qu'il utilise les comportements verbaux et non-verbaux en sa possession, couplés à d'autres micro-compétences telles que l'écoute active et l'empathie. Ces savoir-faire vont contribuer à montrer à l'équipe que le manager est disposé à entendre leurs inquiétudes et qu'il les comprend.

Il doit aussi exploiter ses savoir-faire propres à l'exercice, pour initier convenablement la communication et introduire correctement le sujet.

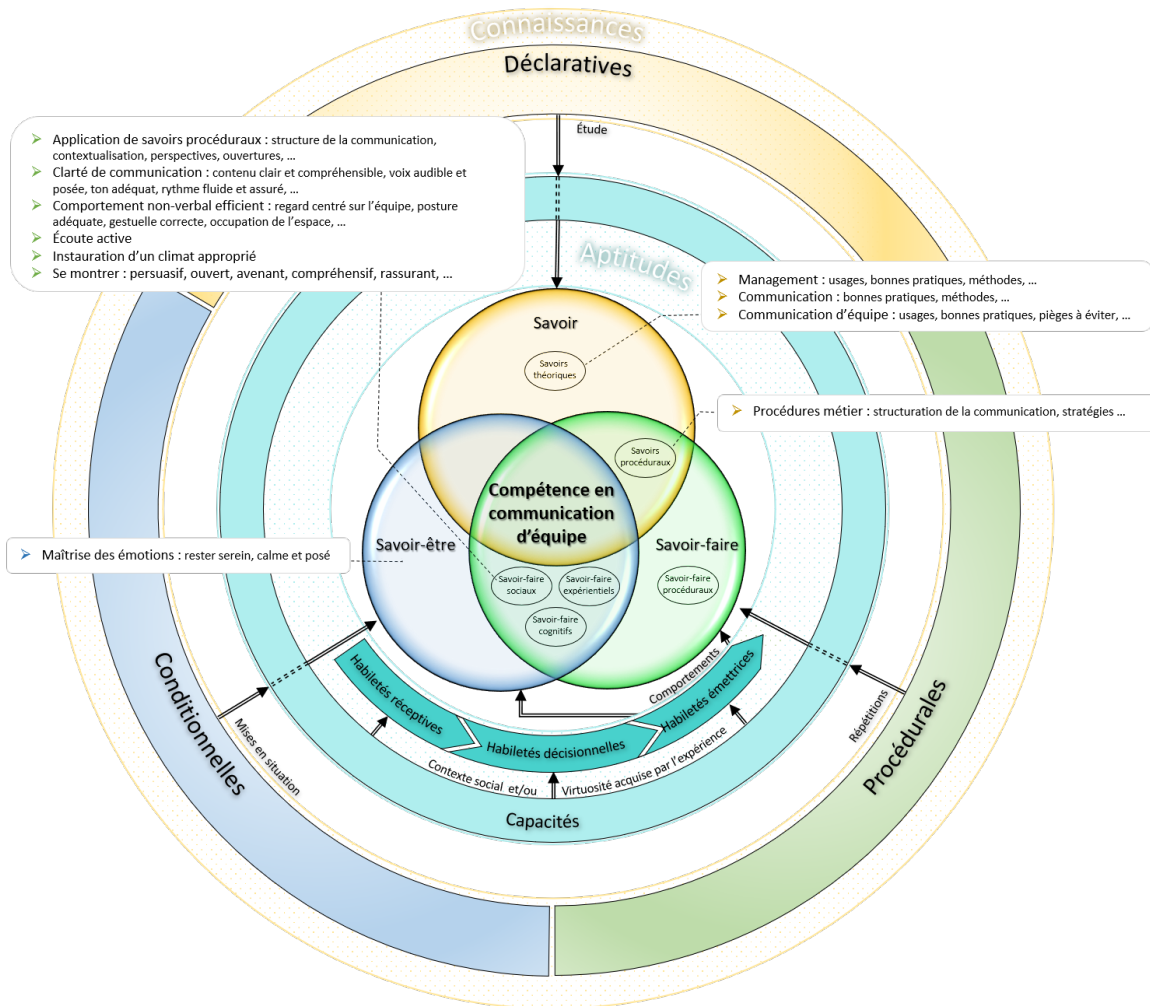


FIGURE 4.4: Représentation des savoirs identifiés du manager, pour la compétence à la communication d'équipe

Il doit ensuite contextualiser la décision de la société, de sorte à en favoriser la compréhension et l'acceptation par l'équipe. Il est tenu de proposer des perspectives et un calendrier à l'équipe. Il est aussi nécessaire qu'il suscite un échange et des questionnements, de sorte à ne pas laisser des inquiétudes et des questionnements nuire au climat au sein de l'équipe.

Enfin, il doit adapter ses comportements et la forme de sa communication à son auditoire. Il doit maîtriser la dimension émotionnelle liée à l'effet d'annonce, afin de maintenir un climat convenable. Il doit instaurer un climat approprié en n'étant ni trop grave, ni trop détendu. Il est également tenu de se montrer avenant, ouvert, compréhensif, rassurant sur les craintes et les interrogations de l'équipe, tout en se montrant persuasif pour défendre, si nécessaire, la décision communiquée.

- Des savoir-être nécessaires à la maîtrise de sa dimension émotionnelle vis à vis de l'annonce. Le manager doit contenir ses émotions lors de l'annonce de la décision, de sorte à conserver un climat d'échanges sain avec son équipe. Il doit maîtriser ses émotions en se montrant serein, calme et posé, afin de ne pas diffuser l'attitude inverse au sein de l'équipe.

3. Problématiques communes de formation

Traditionnellement, les techniques utilisées pour la formation aux compétences sociales comprennent :

- l'acquisition de savoirs théoriques, par des formations théoriques consistant à présenter des modèles et des méthodes métier
- l'apprentissage de savoir-faire, via des mises en pratique accompagnées de conseils, l'établissement d'objectifs et la prescription de tâches répétitives à accomplir pour assimiler des savoirs procéduraux.
- le développement de savoir-être, par le biais de mises en situation sous forme de jeux de rôle accompagnés de feedbacks.

Ces formations peuvent être proposées individuellement, mais il est courant qu'elles soient dispensées en groupes, de sorte à multiplier les sources potentielles d'apprentissage.

En ce qui nous concerne, nous nous intéressons principalement aux mises en pratique et aux mises en situation. Pour ces méthodes d'apprentissage, le fait de vivre une expérience est un levier important et la Réalité Virtuelle peut potentiellement en être un moyen.

Aujourd'hui, les mises en pratique et les mises en situation prennent la forme de jeux de rôle avec le formateur.

Néanmoins, ces formations ont tendance à montrer certaines limites [38].

3.1. Manque de réalisme et de contextualisation

Les situations n'ont pas lieu en contexte réel ce qui limite potentiellement le transfert des compétences.

Ces sessions de formation mobilisent des ressources humaines et représentent des coûts non négligeables [49, 135, 159].

Les rôles sont joués par des pairs ou des formateurs, dont les attitudes peuvent nuire au réalisme et à l'authenticité de la situation. Les acteurs peuvent aussi être ponctuellement sujets à des effets de fatigue et à des manques de cohérence. Dans le cas de groupes de formation partagés par différents formateurs, des disparités peuvent apparaître à cause de différences dans la manière de jouer le rôle [48]. De plus, il est souvent difficile de proposer aux apprenants une large variété de situations ou de profils d'individus [49].

Enfin, l'apprenant s'attend à être mis en difficulté par le formateur et un groupe de spectateurs peut potentiellement influencer sur son comportement.

Généralement, l'entraînement ne s'effectue pas en contexte réel. Ces mises en situation manquent de réalisme, d'authenticité et de pragmatisme [134].

La mise en situation peut également pâtir de l'environnement dans lequel il a été réalisé. Un manager s'entraînant à la communication d'équipe peut par exemple s'exercer dans une salle de réunion. L'environnement ne lui permet pas de vivre la situation fidèlement à la situation réelle. Il ne ressentira ni l'ambiance du lieu, ni ses spécificités, pouvant impacter son ressenti : sons d'atelier pouvant le perturber, espace de déplacement, etc.

Ces lacunes peuvent fortement limiter la dimension émotionnelle de la mise en situation. Celle-ci est pourtant un levier important du développement des compétences sociales chez l'apprenant, qui va autant capitaliser sur les émotions ressenties lors de la mise en situation, que sur le processus de méta-cognition qui suivra.

Ces problématiques ne permettent donc jamais totalement de garantir que les compétences acquises en formation vont être correctement appliquées en situation réelle.

3.2. Impact de la subjectivité dans l'évaluation

Dans le domaine des compétences sociales, la définition d'une bonne prestation est largement subjective et le développement de métriques objectives reste à ce jour une question ouverte [40]. L'évaluation des compétences sociales est souvent ambiguë, basée sur les observations et le ressenti subjectif de l'évaluateur.

Réduire cette part de subjectivité est d'autant plus important, qu'elle impacte potentiellement le processus d'apprentissage de l'apprenant.

Les formateurs effectuent des débriefings après la mise en situation, qui occupent une place cruciale dans la démarche pédagogique. Au cours de ces échanges, il va accompagner l'apprenant dans son processus de méta-cognition et d'auto-analyse de la prestation. Cette spécificité permet d'ailleurs de souligner l'importance du rôle du formateur humain, faisant de lui un élément indispensable devant demeurer au cœur de la mise en situation.

Il apparaît donc important de définir et d'analyser des métriques permettant d'accompagner le formateur dans son évaluation, tout en lui permettant de minimiser l'impact de sa subjectivité.

3.3. Capitalisation sur l'expérience

La question de la capitalisation sur l'expérience de professionnels chevronnés se pose également. Ces sujets expérimentés ont développé leurs compétences, par l'expérience acquise au fil de leur exercice. Ils ont amélioré leurs habiletés vers un niveau d'expertise, en expérimentant au quotidien des stratégies et des méthodes de communication leur permettant d'atteindre leurs objectifs plus efficacement.

La question de la transmission des compétences à des professionnels inexpérimentés est une problématique récurrente. Du fait de leurs responsabilités, les experts sont souvent peu sollicités afin d'accompagner des néo-apprenants. De plus, certains domaines à forte concurrence présentent des roulements d'effectifs réguliers. Il est fréquent que dans ceux-ci, le professionnel change d'entreprise sitôt son expertise acquise.

Déterminer de nouvelles manières pour capter et transmettre efficacement l'expérience acquise, représente donc un enjeu important à l'heure actuelle.

III État de l'art

Les formations traditionnelles aux compétences sociales soulèvent certaines problématiques. Pour répondre à celles-ci, nous avons entrepris d'analyser la littérature afin d'identifier si des solutions potentielles ont déjà été abordées. Ainsi, nous cherchons à voir comment résoudre ces problématiques et garantir des mises en situation de qualité.

Dans un premier temps, nous recensons les travaux ayant cherché à utiliser les technologies immersives pour :

- la formation à la négociation, pouvant correspondre au cas d'usage identifié pour les commerciaux.
- la formation à la prise de parole en public et aux prises de parole délicates, pouvant concorder avec la compétence managériale de communication d'équipe.
- la formation à d'autres cas d'usages pour lesquels les savoirs concernés peuvent coïncider.

Nous analysons ensuite les usages relevés. Nous souhaitons notamment étudier quels mécanismes sont principalement utilisés. Nous cherchons aussi à examiner comment l'interaction et l'immersion sont mis en place au sein de ces environnements d'apprentissage.

En prévision de la réalisation d'un outil répondant aux cas d'usage précédemment identifiés, nous analysons également les manières d'évaluer la pertinence pédagogique des outils recensés.

Nous cherchons aussi à voir quelles bonnes pratiques sont nécessaires afin d'assurer la pertinence de conception. Enfin, nous identifions les pistes de recherche mentionnées dans la littérature.

1. Formation à la négociation

De nombreux travaux visent à utiliser les technologies immersives pour la formation à la négociation. Nous identifions différents types de travaux :

- La formation aux savoirs-faire cognitifs décisionnelles de négociation.
Ces travaux visent à développer spécifiquement les savoir-faire cognitifs en sollicitant uniquement les habiletés décisionnelles de l'apprenant. Pour cela ils s'intéressent principalement à l'apprentissage de mécanismes, des stratégies et des bonnes pratiques de négociation.



FIGURE 4.5: Devault et al. [36], négociation à tour de rôle : personnage virtuel et scène de négociation abstraite

- La formation aux négociations en contexte inter-culturel.
Ces travaux demandent à l'apprenant d'utiliser ses habiletés décisionnelles liées à la négociation, tout en ajoutant une dimension inter-culturelle à prendre en compte. Cette dimension inter-culturelle va aussi concerner les habiletés réceptives et émettrices. La finalité de ces travaux inclue aussi la capacité de l'apprenant à comprendre la situation de négociation, puis celle à émettre des comportements pertinents et efficaces dans un contexte inter-culturel.
- La formation aux entretiens d'embauche.
Ces travaux cherchent à développer les savoir-faire sociaux de l'apprenant, en sollicitant ses habiletés réceptives, décisionnelles et émettrices dans un contexte pouvant inclure des situations de négociation. Ces formations concernent l'entraînement aux entretiens d'embauche, qui peuvent être vu comme des situations de négociation durant lesquelles l'apprenant doit "se vendre" auprès du recruteur.

1.1. Savoir-faire cognitifs de négociation

Plusieurs travaux se focalisent uniquement sur les habiletés décisionnelles en situations de négociation, afin de développer les savoir-faire cognitifs des apprenants. Ils cherchent à utiliser la Réalité Virtuelle, pour permettre à l'apprenant de négocier face à des personnages virtuels ayant un comportement spécifique et des objectifs propres.

Devault et al. [36] ont par exemple travaillé à la réalisation d'un agent virtuel pour la négociation à tour de rôle.

Au sein du scénario, l'apprenant doit mener une négociation de marchandage à partir de ressources abstraites placées entre le personnage virtuel et lui (Figure 4.5). L'apprenant et le personnage virtuel disposent d'objectifs secrets de répartition à atteindre, nécessitant une négociation.

La spécificité de ces travaux réside dans l'utilisation de ressources abstraites comme sujets de la négociation. Ainsi, l'apprentissage concerne plus spécifiquement le développement des savoir-faire cognitifs mis en jeu lors de négociations, que l'objet de la négociation lui-même.

Traum et al. [12, 37] ont implémenté un scénario d'entraînement à la négociation en Réalité Virtuelle, via un système d'agent conversationnel (SASO-ST).

Dans ce scénario militaire, l'apprenant doit négocier avec un docteur virtuel, l'évacuation de sa clinique (Figure 4.6, gauche). Le succès de la négociation dépend de la capacité de l'apprenant à appliquer les bonnes pratiques de négociation, lorsqu'il est confronté à différents comportements de la part du personnage virtuel.

Le système utilise une interface à écran fixe (mur projeté, Figure 4.6, droite). Les propos de l'apprenant sont capturés à partir d'un microphone, puis le système les analyse et dirige les réponses en fonction du scénario.



FIGURE 4.6: Traum et al. [37, 12], SASO-ST : personnage virtuel (gauche) et dispositif de Réalité Virtuelle (droite)



FIGURE 4.7: Lane et al. [38], BiLAT : scène virtuelle (à gauche) et situation de négociation avec un personnage virtuel (à droite)

Lors des premières expérimentations, les retours récoltés par Traum et al. furent globalement positifs. Les auteurs ont observé que les sujets apprenaient de leurs erreurs en utilisant le système. Certains apprenants échouaient dans leur première tentative de négociation, mais étaient ensuite capables de convaincre le docteur dans un second ou un troisième temps. Ils évalueraient ainsi différentes stratégies et les testeraient afin d'assimiler, à terme, la plus optimale.

1.2. Négociations en contexte inter-culturel

La formation aux négociations dans le cadre de situations inter-culturelles est un autre cas d'usage exploré dans la littérature. Dans ces situations, l'apprenant doit adapter ses capacités sociales en prenant en compte le contexte interculturel. Ainsi, les décisions qu'il prend et sa manière de communiquer peuvent avoir une signification et un impact différent dans la culture de son interlocuteur. Pour former à ces savoir-faire sociaux, certains auteurs cherchent à utiliser les technologies immersives comme support pour des mises en situation contextualisées.

Lane et al. [38], rapportent par exemple des travaux sur BiLAT, un système de jeu sérieux pour l'apprentissage de savoir-faire sociaux dans le cadre de la préparation, l'exécution et la compréhension de rencontres bilatérales en contexte inter-culturel.

Destiné à des apprenants du domaine militaire, l'outil permet de s'entraîner à résoudre des problèmes inhérents à ce type de situations.

L'outil est conçu comme un environnement intégrant des négociations gagnant-gagnant, au cours desquelles ils doivent faire appel à leurs connaissances et leurs capacités de compréhension de la culture des personnages virtuels.

Visualisant la simulation sur un ordinateur, les apprenants peuvent sélectionner des actions de conversation à l'aide d'une interface accessible avec la souris (Figure 4.7, droite).



FIGURE 4.8: Anderson et al. [39], projet TARDIS : recruteur virtuel

Ils peuvent également sélectionner des actions physiques, e.g. retirer ses lunettes de soleil, transmettre des fournitures médicales, etc.

Lane et al. ont effectué des expérimentations afin de déterminer la fidélité du personnage virtuel sur le comportement de l'apprenant. Ils ont relevé que les apprenants réfléchissaient plus à leurs actions avec un personnage virtuel en 3 dimensions (3D). Ils expliquent ce phénomène par l'hypothèse que face à un personnage virtuel en 3D, les apprenants se sentiraient plus concernés par l'impact de leurs choix.

1.3. Entretiens d'embauche

Certains auteurs proposent des solutions plaçant les apprenants face à des recruteurs virtuels, afin qu'ils développent les savoir-faire sociaux propres aux entretiens d'embauche.

Anderson et al. [39] rapportent des travaux dans le cadre du projet TARDIS¹. Ce projet européen, vise à créer une plateforme de simulation intégrant des scénarios de formation aux entretiens d'embauche.

Les apprenants ont accès à divers scénarios possibles d'entretiens, au sein desquels ils sont amenés à interagir avec un recruteur virtuel (Figure 4.8).

L'apprenant est positionné face à un ordinateur et à un Microsoft Kinect², permettant ainsi de reconnaître ses expressions, ses mouvements et sa posture.

TARDIS comprend aussi un outil permettant d'analyser l'acquisition des compétences. Ces informations sont accessibles via un outil de débriefing à l'issue de la simulation.

Hoque et al. [40] font état de travaux concernant un système d'entraînement aux entretiens en Réalité Virtuelle, appelé MACH (*My Automated Conversation Coach*).

L'outil permet d'interagir avec un recruteur virtuel capable d'analyser les expressions faciales, le discours et la prosodie de l'apprenant, puis d'y répondre par des comportements verbaux et non verbaux.

Suite à la simulation, l'outil permet de visualiser un feedback relatif à sa prestation.

Le personnage virtuel est affiché sur un écran téléviseur 46", en face de l'apprenant, lui-même suivi par un Microsoft Kinect placé au-dessus de l'écran (Figure 4.9).

À l'issue de leurs expérimentations, Hoque et al. ont observé que les apprenants avaient amélioré leurs compétences en utilisant l'outil.

1. <http://www.tardis-project.eu>

2. <http://developer.microsoft.com/en-us/windows/kinect>



FIGURE 4.9: Hoque et al. [40], My Automated Conversation Coach (MACH)

2. Prises de parole publiques et délicates

De nombreux travaux s'intéressent à la formation pour des mises en situation pouvant correspondre au cas d'usage de la communication d'équipe du manager. Nous identifions deux types de travaux :

- La formation aux prises de parole en public.

Ces travaux cherchent à développer les savoir-faire sociaux liés aux prises de parole face à un auditoire. Ils visent principalement à solliciter les habiletés émettrices (verbales et non-verbales) de l'apprenant.

Ils peuvent également cibler le développement des savoir-être liés à la gestion des émotions dans ce contexte particulier.

- La formation aux prises de parole délicates.

Ces travaux ont pour finalité le développement des savoir-faire sociaux liés aux communications ou aux annonces en contexte délicat. Au cours de celles-ci, l'apprenant ne devra pas seulement solliciter ses habiletés émettrices. Il devra également faire appel à ses habiletés réceptives pour anticiper les réactions de son auditoire, tout comme utiliser ses habiletés décisionnelles de sorte à choisir les bonnes stratégies de communication permettant de conserver un climat sain.

Là encore, ces travaux peuvent également viser le développement de savoir-être liés à la gestion des émotions, afin que l'apprenant reste maître d'une situation pouvant l'affecter.

2.1. Prises des parole en public

Plusieurs travaux s'intéressent à l'utilisation des technologies immersives pour la formation aux présentations publiques.

Au cours de ces situations, l'apprenant va devoir utiliser ses savoir-faire sociaux afin de s'exprimer correctement en utilisant ses habiletés émettrices verbales et non verbales. Il va également utiliser des savoir-être plus personnels, afin de gérer ses émotions et éviter qu'elles ne viennent nuire à sa communication.

Chollet et al. [41, 42, 43], rapportent par exemple des travaux sur un outil d'entraînement à la prise de parole en public en Réalité Mixte.

L'apprenant y est amené à développer ses savoir-faire sociaux en effectuant une présentation face à une audience virtuelle (Figure 4.10, gauche). Celle-ci peut opter pour des postures positives (acquiescements, posture en avant), ou négatives (hochements de tête, posture en arrière, bras croisés).

L'auditoire est affiché via des interfaces à écrans fixes, positionnés sur des pans de mur au sein d'une pièce représentant une scène de présentation. L'utilisateur dispose notamment d'un ordinateur projetant une présentation sur un écran (Figure 4.10, droite).

La voix de l'apprenant est enregistrée grâce à un microphone et ses mouvements par un Microsoft Kinect. Deux caméras sont également placées afin de filmer son buste sous différents angles de vue. À partir de ces moyens de capture, le système produit une évaluation automatique de l'apprenant sur son anxiété et sur la qualité de sa prestation.



FIGURE 4.10: Chollet et al. [41, 42, 43], Cicero : audience virtuelle (gauche) et dispositif de Réalité Mixte (droite)

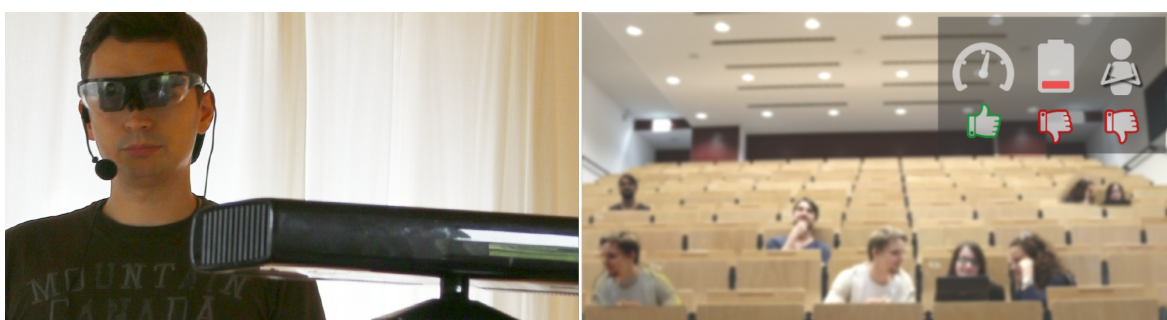


FIGURE 4.11: Damian et al. [44], Logue : interfaces (gauche) et feedback (droite)

Les auteurs ont observé que de manière générale, les savoir-faire sociaux des apprenants se sont améliorés suite à l'utilisation de l'outil.

Damian et al. [44] ont quant à eux cherché à exploiter la Réalité Augmentée, en apportant du feedback en temps réel sur la prestation en l'affichant dans le champ de vision.

L'apprenant est donc équipé de lunettes de Réalité Augmentée, afin d'afficher ces informations (Figure 4.11, gauche). Un Microsoft Kinect est positionné face à lui, permettant de capturer ses mouvements. Le système analyse ses comportements, puis l'informe sur des aspects tels que son débit de parole, son énergie et sa posture (Figure 4.11, droite).

Lors des expérimentations, Damian et al. ont mesuré un impact positif sur la prestation des sujets utilisant le système avec feedback. Enfin, certains sujets ont souligné un sentiment de sécurité lors de l'utilisation du système.

Certains travaux explorent l'utilisation des technologies immersives, afin de favoriser plus spécifiquement l'acquisition des habiletés émettrices de communication non-verbale lors des prises de paroles publiques.

C'est le cas de **Schneider et al.** [45] qui utilisent la Réalité Augmentée pour leur Presentation Trainer. Il s'agit d'un outil conçu pour entrainer ses habiletés oratoires basiques, en apportant un feedback immédiat sur différents aspects de la communication non-verbale.

Lors d'un exercice, l'apprenant observe un reflet virtuel de son image en temps réel. Le reflet est augmenté par une interface graphique permettant d'afficher des informations en fonction de son comportement non-verbal (Figure 4.12, gauche).

L'affichage du reflet de l'utilisateur est effectué via une interface à écran fixe (Figure 4.12, gauche). Le système utilise un Microsoft Kinect pour suivre le corps et la voix de l'apprenant.

Les résultats des expérimentations ont montré que le feedback apporté par le prototype a eu un impact positif en augmentant la motivation de l'apprenant, sa capacité à identifier ses propres erreurs, la confiance en son argumentaire, ainsi qu'en améliorant ses prestations pendant et après la session d'apprentissage.

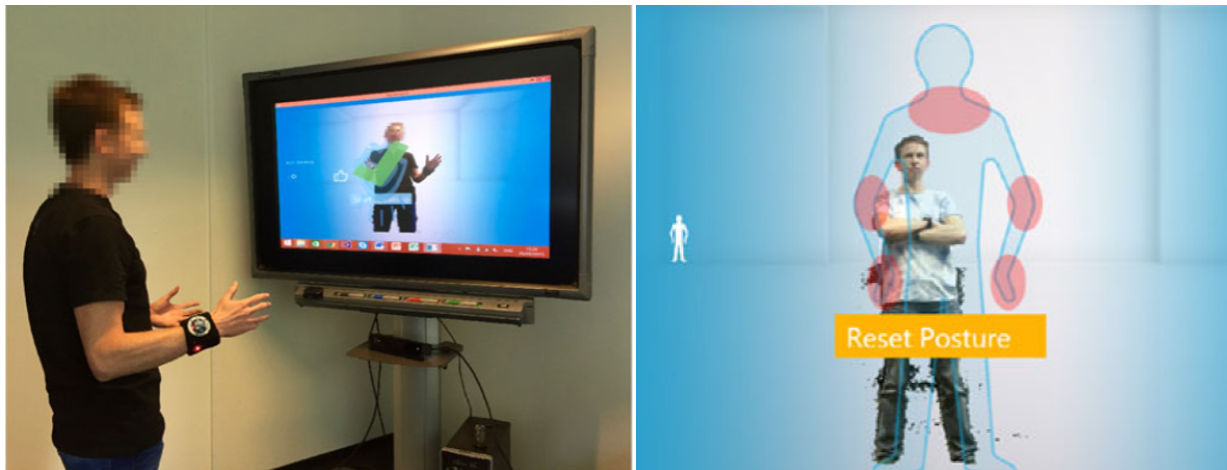


FIGURE 4.12: Schneider et al. [45], Presentation Trainer : interfaces (gauche) et feedback correctif (droite)



FIGURE 4.13: Pertaub et al. [46, 47], anxiété à la prise de parole en public : différents types d'audience

D'autres auteurs s'intéressent à l'utilisation des technologies immersives pour le développement des savoir-être liés à la gestion des émotions lors de prises de parole en public.

Pertaub et al. [46, 47] se sont par exemple intéressés à l'anxiété à la prise de parole en public. Ils ont réalisé une expérimentation afin d'évaluer l'impact de personnages virtuels sur l'anxiété lors d'une prise de parole en public. Pour cela, ils ont implémenté un prototype en Réalité Virtuelle. Les sujets devaient effectuer des discours au sein d'une salle de séminaire virtuelle, face à un public au comportement prédéfini : neutre, amical ou hostile (Figure 4.13). Les personnages étaient animés en continu et jouaient des comportements autonomes de manière aléatoire. Ils adoptaient différents types de comportements non-verbaux (e.g. expressions faciales, postures, bâillements, hochements de tête, sortie de la salle, ovation de l'orateur, etc.) et suivaient les sujets du regard s'ils se déplaçaient dans la scène.

Une partie des apprenants utilisait un visiocasque de Réalité Virtuelle, et l'autre partie une interface à écrans fixes.

Suite à leurs expérimentations, Pertaub et al. ont mesuré un impact sur le niveau de l'anxiété chez les sujets ayant été confronté à une audience d'attitude négative. Utiliser une audience virtuelle peut donc être un outil intéressant pour faire vivre une situation émotionnelle à l'apprenant.

2.2. Prises de parole délicates

Les situations de communications délicates ont également fait l'objet de travaux. L'apprenant doit utiliser ses savoir-faire sociaux afin de communiquer à autrui, une information qui peut être difficile à accueillir.



FIGURE 4.14: Kron et al. [48], MPathic-VR

Dans le domaine médical par exemple, des études ont montré que la manière de délivrer une mauvaise nouvelle avait un impact significatif sur le processus thérapeutique [49]. Plusieurs auteurs utilisent donc la Réalité Virtuelle afin de simuler le comportement d'un patient, et permettre aux praticiens de s'entraîner à cet exercice délicat.

Kron et al. [48] ont par exemple proposé MPathic-VR, un outil destiné à former des professionnels de santé à l'annonce de mauvaises nouvelles.

L'apprenant y est amené à échanger avec un patient virtuel (Figure 4.14). Il doit interpréter ses comportements verbaux et non verbaux, puis y répondre par le biais des stratégies de communication adéquates.

L'apprenant effectue sa simulation via l'écran d'un ordinateur, équipé d'une caméra et d'un microphone. Le système enregistre ses choix au cours de la conversation, ainsi que ses comportements non verbaux. L'analyse de ces données permet de l'évaluer, de lui apporter du feedback et d'adapter en temps réel le comportement du personnage virtuel.

Kron et al. ont mesuré que les apprenants avaient amélioré leurs compétences en communication après l'utilisation de l'outil. Ils ont aussi observé des attitudes plus efficaces chez les apprenants étant passés sur le système, les amenant à vivre des situations réelles plus positives.

Autre exemple, **Ochs et al.** [49] travaillent sur la réalisation d'un agent conversationnel animé afin d'entraîner les docteurs à annoncer de mauvaises nouvelles.

Les praticiens peuvent s'entraîner au contact d'un agent, qui simule un patient tout en adaptant ses comportements à leur prestation.

Le personnage virtuel est intégré au sein d'une salle immersive (CAVE, Figure 4.15). La pièce intègre différents capteurs permettant de détecter et reconnaître en temps réel le comportement verbal et non-verbal des apprenants. Le système comprend également un système de reconnaissance vocale.

Un Microsoft Kinect est installé, afin de détecter automatiquement certains signaux non verbaux émanant des apprenants, tels que la direction du regard, les mouvements de tête, la posture, ou encore les expressions faciales. L'objectif de ces suivis est de permettre au personnage virtuel de coordonner son comportement, à partir de celui de l'apprenant.

3. Autres cas d'usage

D'autres travaux s'intéressent à des savoirs pouvant potentiellement être concernés par nos cas d'usage.

Johnson et al. [134], **Morton et al.** [160], **Sykes et al.** [161, 162] et **Emonts et al.** [163] proposent notamment des environnements virtuels destinés à l'apprentissage de langues étrangères.

Dans ces environnements, les apprenants vont pouvoir observer des scènes de dialogue, tout comme s'exercer afin de développer leurs savoir-faire dans une langue étrangère. Ceux-ci sont notamment utilisés pour les commerciaux lors d'une négociation avec un client.



FIGURE 4.15: Ochs et al. [49], entraînement de docteurs à l'annonce de mauvaises nouvelles : salle immersive (CAVE)



FIGURE 4.16: Babu et al. [50], protocoles culturels indiens de communication : dispositif de Réalité Virtuelle

Babu et al. [50] se sont intéressés aux communications inter-culturelles, en rapportant des travaux sur les protocoles culturels indiens de communication.

Ils ont réalisé un prototype, dans lequel l'apprenant est confronté à deux personnages virtuels (Figure 4.16). Avec eux, l'apprenant va pouvoir pratiquer les différents protocoles sociaux tels que le salut et le remerciement.

Ce cas d'usage peut correspondre aux savoir-faire procéduraux que l'apprenant doit développer lorsqu'il rencontre un client d'une culture différente de la sienne.

Cordar et al. [51] se sont quant à eux intéressés aux protocoles métiers de communication, en ciblant le cas d'usage d'une communication en boucle fermée dans le domaine médical³. Ils ont intégré des personnages virtuels dans un environnement mixte (Figure 4.17).

Ce cas d'usage s'intéresse au développement de savoir-faire procéduraux métier, en entraînant les apprenants à leur répétition. Il est possible de reproduire cette méthode sur les protocoles métiers de nos deux cas d'usage (e.g. protocoles d'échanges lors d'une négociation, structuration de la communication lors d'une annonce délicate).

3. La communication en boucle fermée consiste à faire répéter l'information en actions distinctes [164]. Elle permet d'améliorer la fiabilité des communications.



FIGURE 4.17: Cordar et al. [51], protocoles médicaux de communication en boucle fermée : dispositif de Réalité Mixte

Les travaux de **Mathieu et al.** [165] s'intéressent à la formation à des savoir-faire commerciaux. Les auteurs rapportent la réalisation d'un jeu sérieux, destiné à former des diplômés d'école de commerce, à la vente au détail et au management des relations commerciales. Au sein de celui-ci, les apprenants vont être amenés à gérer la satisfaction des clients en effectuant plusieurs tâches au sein d'un commerce de proximité virtuel, peuplé d'agents autonomes.

Enfin, plusieurs auteurs s'intéressent à des savoir-faire sociaux correspondant au cas d'usage managers. **Hays et al.** [135] proposent par exemple une expérience de formation au leadership en Réalité Mixte. L'apprenant effectue des mises en situation avec un personnage virtuel, intégré à taille humaine dans une salle de cours.

Huguet et al. [159] rapportent des travaux destinés à la formation des leaders d'équipes médicales en environnement virtuel. L'objectif de l'environnement consiste à former les apprenants aux compétences liées au travail d'équipe et à la gestion des facteurs humains. Pour cela, ils sont amenés à interagir avec des agents autonomes au sein de l'environnement virtuel.

4. Analyse des usages

Comme nous venons de le voir, de nombreux travaux utilisant les technologies immersives pour la formation aux compétences sociales sont présents dans la littérature. Nous analysons dans cette section les usages, afin d'ouvrir des perspectives pour la conception pertinente d'un environnement de formation.

4.1. Utilisation des technologies immersives

Nous observons que la majorité des travaux s'intéresse à l'utilisation des technologies immersives pour la formation aux savoir-faire procéduraux et sociaux. Ces technologies peuvent permettre de réaliser des répétitions pour acquérir des savoir-faire procéduraux, ou des mises en situation pour développer ses savoir-faire sociaux.

Il faut néanmoins noter que certains travaux s'intéressent aussi au développement de savoir-faire cognitifs, nécessitant un traitement de l'information, des raisonnements et le développement de stratégies afin d'atteindre des objectifs en contexte social.

Enfin, certains d'entre eux cherchent à exploiter la Réalité Virtuelle afin de développer les savoir-être liés à la gestion des émotions.

4.2. Utilisation des agents conversationnels incarnés

Les travaux recensés dans cet état de l'art utilisent majoritairement des personnages virtuels avec lesquels l'apprenant va interagir pour développer ses compétences sociales. Ces personnages, munis de comportements communicatifs sont appelés "*Agents Conversationnels Incarnés*".

4.2.1. Les agents conversationnels incarnés

Amini et al. [57] définissent les Agents Conversationnels Incarnés (*Embodied Conversational Agents (ECA)*) de la manière suivante.

Agents conversationnels incarnés :

Entités virtuelles créées avec une représentation physique anthropomorphe et capable d'avoir une conversation avec un homologue humain, en utilisant une certaine intelligence artificielle généralement appelée "agent".

Comme le soulignent Lane et al. [38], les personnages virtuels tendent à induire une sensation de présence sociale chez l'apprenant. Nous avons vu que la sensation de présence sociale tendrait à favoriser à son tour l'apprentissage.

Les Agents Conversationnels Incarnés constituent ainsi une interface naturelle à travers laquelle l'utilisateur interagit en utilisant ses habiletés émettrices (propos, voix, langage corporel, expressions faciales, etc.). La présence sociale apportée par ces personnages virtuels va donc constituer un levier intéressant dans le développement des compétences sociales de l'apprenant.

De plus, les apprenants peuvent se revoir face à un personnage virtuel, puis répéter la situation en étant libres d'expérimenter différents dialogues, expressions et attitudes non-verbales [48]. Cette possibilité, permettant de rejouer une situation à l'identique en appliquant des comportements et des stratégies différentes, représente une plus-value intéressante des Agents Conversationnels Incarnés.

4.2.2. Analyse des niveaux d'interaction et de perception

Nous avons vu qu'en Réalité Virtuelle et en Réalité Mixte, l'utilisateur est au centre du système, lui permettant de percevoir et d'interagir avec des environnements, respectivement virtuels et mixtes. Les notions de perception et d'interaction sont donc deux composantes principales de ces environnements. Afin de situer les travaux utilisant les technologies immersives pour interagir avec des agents conversationnels incarnés, nous proposons de les évaluer selon deux dimensions⁴ :

- une dimension perceptive (P), relevant du degré d'immersion de l'interface visuelle utilisée afin de percevoir l'environnement virtuel ou mixte ;
- une dimension interactive (I), propre aux fonctionnalités d'interaction sociale permises par l'outil.

Ainsi, nous cherchons à construire un espace bidimensionnel Interaction-Perception, permettant de situer les travaux sur un espace allant par exemple, des dialogueurs (*chatbots*) aux situations réelles (Figure 4.1).

Nous proposons de classer les différents travaux relevés dans la littérature sur cet espace, à partir des informations communiquées par les auteurs⁵ (Figure 4.19).

Lorsque nous analysons cette distribution au sein de l'espace que nous venons de construire, il est intéressant de constater plusieurs particularités.

À l'exception des travaux de Huguet al. [159], tous les travaux utilisant des interfaces visuelles allant du grand écran au visiocasque obtiennent un score d'interaction supérieur ou égal à la valeur moyenne possible (6/12).

Il apparaît que les travaux utilisant un niveau de perception accru mettent en place un nombre de fonctionnalités d'interaction important. En cherchant à se rapprocher de la perception d'une situation réelle, les auteurs tendraient à mettre en place une interaction également plus fidèle.

4. La manière de positionner les travaux sur ces deux dimensions est spécifiée en Annexe 4

5. Le détail de ces évaluations peut être consulté en Annexe 5

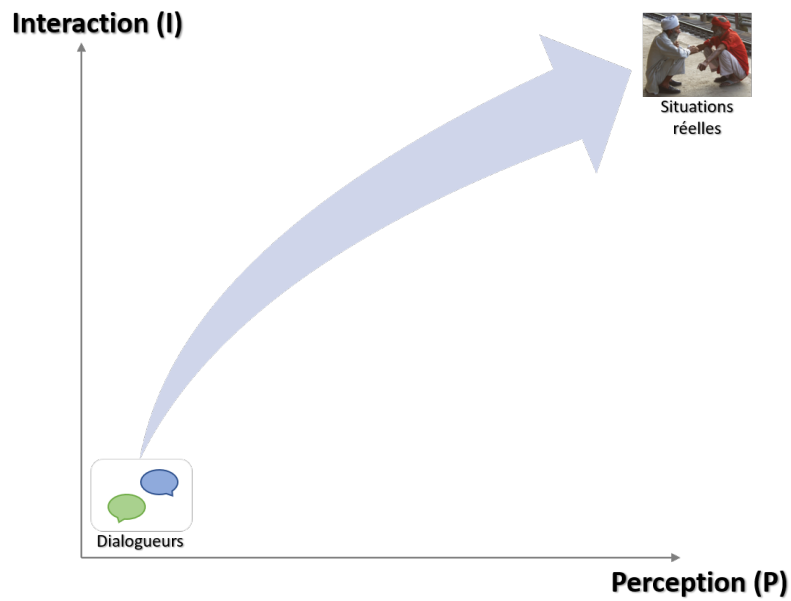


FIGURE 4.18: Espace Interaction-Perception pour l'évaluation d'outils utilisant des personnages virtuels via les technologies immersives

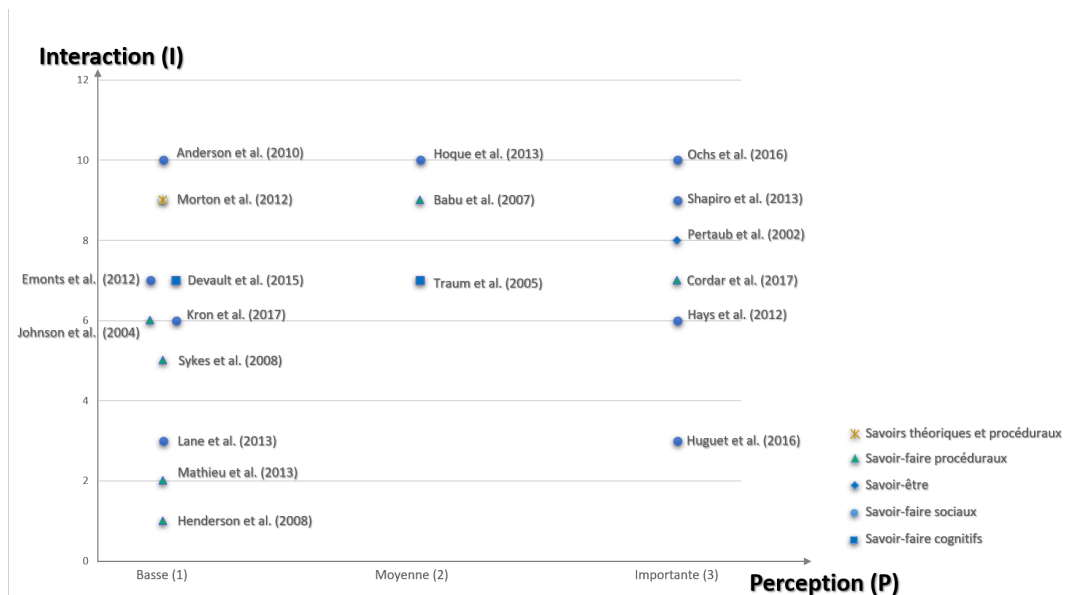


FIGURE 4.19: Positionnement des travaux de la littérature sur l'espace d'évaluation Interaction-Perception

Il est possible qu'apporter une perception accrue, en utilisant des interfaces sensorielles plus immersives sans en faire de même pour l'interaction, puisse ne présenter que trop peu de plus-value.

Les travaux relatifs au développement de savoir-faire cognitifs obtiennent tous un score d'interaction supérieur à la moyenne. Ces travaux nécessitent de travailler sur des schémas de pensée, e.g. analyse d'information, prise de décisions, développement de stratégies, etc. Pour des outils destinés à développer des savoir-faire cognitifs, une haute fidélité d'interaction semble donc être nécessaire pour que l'apprenant puisse se focaliser sur ses processus cognitifs.

Enfin, on peut observer que la majorité des travaux concernant l'acquisition de savoir-faire procéduraux ne semblent pas implémenter d'importants niveaux d'interaction.

Pour ces savoir-faire, l'apprenant va s'entraîner à répéter des procédures bien spécifiques. Celles-ci peuvent tant s'appliquer à des comportements verbaux, que non-verbaux. Il semble donc logique que les outils de formation aux savoir-faire procéduraux ne cherchent pas à atteindre un haut niveau d'interaction. Cela peut être dû au fait que le type d'interaction concernée par l'apprentissage est spécifique au sujet de l'apprentissage.

Si l'on prend l'exemple des travaux de Sykes et al. [161, 162] sur l'apprentissage de langues étrangères, il n'est pas forcément nécessaire et pertinent que le personnage virtuel adopte des comportements non-verbaux (expressions faciales, postures), ni qu'il prenne en compte ceux de l'apprenant.

5. Précautions et bonnes pratiques

5.1. Capitalisation de modèles métier existants

La plupart des travaux recensés s'appuient sur des travaux et des modèles métiers du domaine concerné.

Babu et al. [50] utilisent un modèle "étudiant-apprenti" pour leur outil de formation aux protocoles de communication culturels indiens. Ils se basent sur des travaux proposant d'utiliser deux personnages virtuels, l'un d'entre eux faisant office d'instructeur [166].

Ils s'appuient également sur la littérature décrivant les coutumes, normes et convenances de la culture sud-indienne.

D'autres auteurs se basent sur des modèles et des travaux de différents domaines scientifiques [48, 135, 159].

S'appuyer sur des modèles spécifiques, permet ainsi de produire des expériences, des personnages virtuels et des scénarios pertinents, apportant ainsi des garanties sur la qualité des outils développés.

5.2. Contournement de difficultés technologiques : le Magicien d'Oz

La réalisation d'agents conversationnels reste à ce jour une tâche complexe, nécessitant des travaux importants en reconnaissance vocale, en reconnaissance lexicale et en intelligence artificielle. Pour y répondre, plusieurs travaux mettent en avant l'utilisation d'un contrôle extérieur des personnages virtuels, appelé Magicien d'Oz.

Lors des expérimentations, Cordar et al. [51] ont utilisé un opérateur dissimulé derrière un rideau. Les auteurs ont justifié ce choix par leur volonté de surmonter des problèmes potentiels de reconnaissance vocale, susceptibles d'affecter l'apprentissage et de fausser les résultats. Néanmoins, afin de limiter l'impact sur la sensation de présence sociale, les participants furent équipés d'un micro et n'eurent pas l'information que les personnages virtuels étaient pilotés.

Des études montrent en effet que contrôler un personnage virtuel sans que le sujet n'en soit informé, plutôt que lui attribuer un comportement autonome, peut en favoriser l'influence sociale [167].

D'autres travaux ont également demandé à un opérateur de déclencher les réactions des personnages virtuels [41, 46]. Les personnages virtuels réagissent ainsi en temps réel, en fonction de la prestation de l'apprenant.

Au cours de leurs travaux sur l'apprentissage de la négociation, Devault et al. [36] se sont appuyés sur leurs travaux amont de réalisation d'une interface de pilotage de personnages virtuels [168, 169, 170].

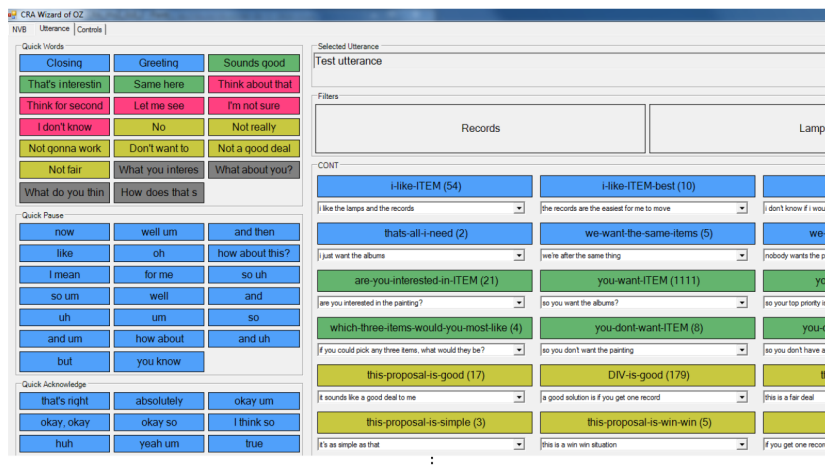


FIGURE 4.20: Devault et al. [36], négociation à tour de rôle : vue partielle de l'interface magicien d'Oz

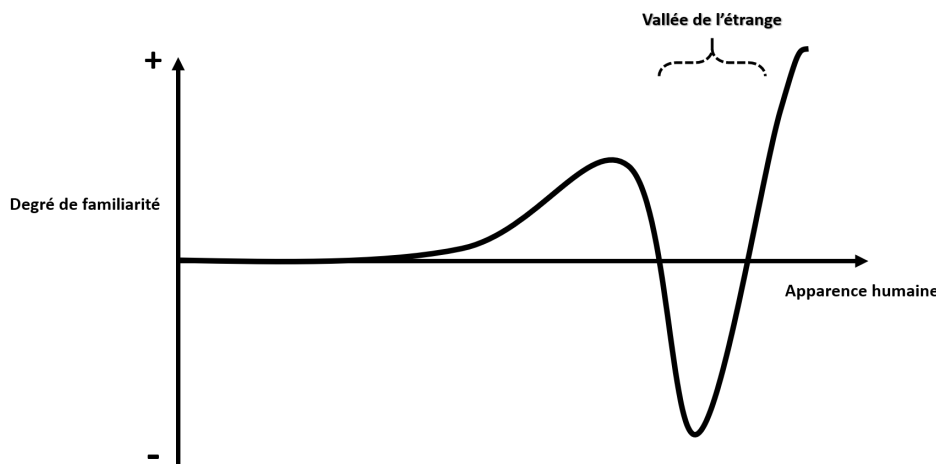


FIGURE 4.21: Vallée de l'étrange (ou "uncanny valley") [52, 53]

L'approche magicien d'Oz permet différents apports méthodologiques. Elle favorise l'exploration de pistes de conception pour un futur système automatisé, ainsi que l'émergence d'hypothèses sur la manière dont interagissent les utilisateurs et les personnages virtuels. Ils ont donc réalisé une interface complète, comprenant une trentaine de dialogues possibles (Figure 4.20) et permettant à deux opérateurs de déclencher respectivement les comportements verbaux et non verbaux du personnage virtuel.

Utiliser le principe du Magicien d'Oz semble donc être une alternative intéressante afin de contourner certaines difficultés technologiques, tout en concevant des environnements permettant d'élaborer les modèles et les scénarios d'un outil potentiellement automatisé.

5.3. Réalisme des personnages virtuels, vallée de l'étrange

Morton et al. [40] ont volontairement voulu apporter un haut niveau de réalisme à leur personnage virtuel, en partant du principe qu'il peut contribuer à générer du stress chez l'apprenant. Ils comptaient permettre une situation d'entretien réaliste sur le plan émotionnel. Les réponses des sujets lors des questionnaires ont confirmé ce choix, signifiant leur préférence pour un personnage réaliste par rapport à un personnage cartoonnesque.

Cependant, un haut réalisme chez les personnages virtuels peut occasionner un problème bien connu, appelé la "vallée de l'étrange" (ou "uncanny valley"). Cette théorie, décrite pour la première fois par Mori [52] en 1970, rapporte que plus un robot ou un personnage virtuel est similaire à un être humain, plus ses imperfections paraissent gênantes pour un observateur (Figure 4.21).

Il est donc nécessaire d'être vigilant lorsqu'on ajuste le niveau de réalisme chez des personnages virtuels, de sorte à assurer un niveau de présence sociale satisfaisant, tout en faisant attention à ne pas gêner l'apprenant.

5.4. Précautions d'expérimentation

Les auteurs respectent quelques précautions importantes à prendre en compte, lorsqu'ils expérimentent des outils de formation aux compétences sociales utilisant les technologies immersives.

5.4.1. Familiarisation avec l'environnement virtuel

Il est important de souligner que, de manière récurrente, les travaux mettent en place une phase d'information et d'accoutumance à l'outil avant l'expérimentation. Pour ne pas biaiser les résultats et afin de mettre l'apprenant dans des conditions optimales, il est courant de l'informer sur le sujet et l'expérimentation. Il est aussi fréquent de lui permettre de se familiariser avec les différentes interfaces, avant l'expérimentation.

Babu et al. [50] ont d'abord fourni une notice d'information aux sujets, avant qu'ils lisent un court texte pour s'entraîner à utiliser le système de reconnaissance vocale.

Damian et al. [44] ont effectué une présentation détaillée du système, pour être sûr que les sujets avaient pleinement compris la corrélation entre leurs comportements et le feedback affiché par le système. Là encore, les sujets étaient ensuite amenés à prendre en main l'outil afin de s'y familiariser.

Ces phases de familiarisation au système sont donc importantes. Elles permettent à l'apprenant de s'habituer à l'outil, à l'environnement virtuel, augmenté ou mixte, de sorte à pouvoir ensuite exploiter pleinement les fonctionnalités dédiées à l'apprentissage.

5.4.2. Variabilités inter-sexe

Enfin, des travaux soulignent l'impact du sexe lors de l'interaction avec une machine [36, 171]. Le fait de se retrouver face à un personnage de sexe opposé, impacterait en effet l'interaction sociale.

Certains auteurs ont par exemple volontairement confronté les sujets à un personnage virtuel du même sexe, pour limiter ces effets.

6. Observations, pistes et perspectives relevées

L'exploration de la littérature a permis d'identifier certaines pistes de recherche pour la formation aux compétences sociales via les technologies immersives :

— *Études long terme sur le transfert des compétences*

Un des verrous fréquent identifié dans la littérature concerne l'évaluation de l'impact des outils de formation sur le transfert des compétences à long terme. Plusieurs auteurs soulignent le fait que les effets long terme soient inconnus [45, 51].

— *Comparaison à des situations traditionnelles*

Dans certains domaines, les auteurs soulignent l'absence de comparaisons des outils avec les formations traditionnelles. Pour les compétences sociales en contexte interculturel par exemple, la plupart des études ne cherchent pas à comparer les outils avec les méthodes traditionnelles utilisées en classe [38]. Les apports éventuels, en termes d'efficacité par rapport aux moyens traditionnels, ne sont pas encore suffisamment connus.

— *Apports face aux jeux de rôles présentiels*

Lorsque les moyens de formation traditionnels consistent à effectuer des jeux de rôles présentiels, l'absence de travaux comparant les outils à ces mises en situation se fait ressentir.

Certains auteurs soulignent l'absence d'études formelles, destinées à déterminer si l'utilisation d'environnements virtuels de formation sont plus efficaces que les jeux de rôle en présentiel [37, 38].

— *Impact de l'interface visuelle sur l'apprentissage*

Nous n'avons pas relevé de travaux visant à évaluer si des différences d'efficacité existent en fonction des interfaces visuelles. Nous avons vu que les travaux en Réalité Virtuelle utilisent des interfaces visuelles variées. Pour un outil de formation aux compétences sociales, nous n'avons cependant pas trouvé de travaux cherchant à évaluer la plus-value d'utilisation d'un visiocasque par rapport à un écran d'ordinateur ou un écran projeté.

7. Conclusions de l'état de l'art

Dans cette section, nous avons cherché à dresser un état de l'art des différents travaux, concernant la formation aux compétences sociales par l'utilisation des technologies immersives.

Pour pouvoir analyser et situer nos travaux dans le futur, nous avons cherché à classer les travaux de la littérature en fonction de leurs degrés d'interaction et de perception. Pour cela, nous avons proposé un espace permettant de les positionner selon ces deux dimensions.

Nous avons également cherché à relever les moyens nécessaires pour garantir une pertinence de conception et tenté d'identifier les pistes de recherche dans le domaine.

Suite à cette étude, nous observons que peu de travaux semblent concerner spécifiquement la formation des managers et commerciaux sur les cas d'usage que nous avons identifié. Une des explications possibles peut tant venir des spécificités de ces types de formation, que du niveau d'abstraction nécessaire pour en cibler les compétences, les habiletés, les objectifs et les métriques d'évaluation.

Nous avons également constaté que tous les travaux n'utilisent pas forcément des interfaces visuelles à haut degré d'immersion, tels que les visiocasques ou les salles immersives. Néanmoins, la démocratisation récente des technologies a amené une recrudescence de travaux cherchant à les exploiter.

De plus, bien que certaines initiatives intéressantes tendent à émerger en Réalité Augmentée et en Réalité Mixte, la Réalité Virtuelle reste majoritairement plus plébiscitée dans la littérature. Le fait de pouvoir aisément modéliser des environnements virtuels, avec des niveaux d'immersion et d'interaction plus ou moins variés, y est probablement pour beaucoup.

Un des verrous régulièrement cités dans la littérature provient de complexités technologiques liées à l'intelligence artificielle ou à la reconnaissance vocale.

Cependant, il est important de noter que certaines méthodes ou astuces permettent de contourner de potentielles difficultés technologiques. La littérature regorge d'exemples dans lesquels des techniques, telles que le magicien d'Oz, permettent d'éviter ces problématiques et d'étudier malgré tout les outils.

Nous avons précédemment identifié plusieurs problématiques inhérentes à la formation aux compétences sociales.

La pluralité des travaux montre de nombreuses propositions d'outils visant des apports de réalisme et de contextualisation via l'utilisation des technologies immersives. Pour bon nombre d'entre eux, les expérimentations tendent à montrer un impact positif sur l'apprentissage.

De nombreux travaux proposent aussi des outils permettant d'apporter un feedback aux formateurs et à l'apprenant. Il s'agit là de perspectives intéressantes à explorer afin de viser à résoudre la problématique de l'impact de la subjectivité dans l'évaluation.

Néanmoins, il faut noter que nous n'avons pas relevé de travaux cherchant à résoudre la problématique de capitalisation sur l'expérience que nous avons identifié.

Cette étude a donc permis de soulever des travaux innovants et originaux, d'apporter des pistes d'exploitation des technologies immersives.

Elle a également permis de souligner le peu de travaux appliqués à la formation des managers et commerciaux.

Enfin, elle a servi de base à la réalisation d'un outil de formation aux compétences sociales pour ces métiers-là, présenté dans la section suivante.

IV L'Holodeck Safran

Nos travaux autour des compétences sociales entrent dans le cadre d'une collaboration avec l'entreprise Safran Helicopter Engines. Cette filiale du groupe Safran, est un fabricant français de turbines dans les domaines de l'aérospatial, de la défense et du ferroviaire. Réalisant principalement des moteurs d'hélicoptères, l'entreprise est présente à l'international et emploie près de 6000 personnes dans le monde.

C'est avec l'académie de formation de Safran Helicopter Engines, que nous avons cherché à analyser les potentielles plus-values des technologies immersives pour la formation des managers et des commerciaux.

L'état de l'art présenté dans la section précédente, a ainsi été réalisé à partir des problématiques récoltées auprès des formateurs de Safran Helicopter Engines Academy. L'objectif était de se baser sur cet état de l'art pour définir les périmètres fonctionnels d'un outil de formation aux compétences sociales, en capitalisant sur les apports des technologies immersives.

Nous avons relevé l'importance de s'appuyer sur le domaine métier.

Des ateliers de co-création ont donc été organisés avec les formateurs. Les idées formulées au cours de ces ateliers ont ainsi permis de dessiner le périmètre fonctionnel d'un outil de formation aux compétences sociales : l'Holodeck Safran. La finalité de l'outil consiste à capitaliser sur les technologies immersives en vue de répondre aux problématiques des formations traditionnelles.

Dans cette section, nous commençons donc par présenter le prototype d'outil conçu. Nous cherchons ensuite à analyser sa pertinence, tant pour sa conception que pour ses apports pédagogiques.

1. Le prototype

Au vu des fonctionnalités imaginées par les formateurs, la Réalité Virtuelle a très vite semblé être la technologie la plus pertinente pour l'outil.

Outre le fait qu'il s'agisse de la technologie majoritairement utilisée dans la littérature, les formateurs souhaitaient résoudre les problématiques spécifiquement liées aux mises en situation traditionnelles.

Un prototype d'outil a été réalisé grâce au moteur de jeu Unity.

Il se compose de deux éléments :

1. une application Réalité Virtuelle pour l'apprenant ;
2. un panneau de contrôle pour le formateur.

1.1. Application Réalité Virtuelle

Utilisée par l'apprenant pour jouer la mise en situation, elle utilise un visiocasque HTC VIVE.

Lors de l'analyse de la littérature, nous avons relevé la nécessité d'une prise en main préalable des outils par les utilisateurs, afin de les familiariser tant à l'outil qu'à la technologie. Après avoir été équipé du visiocasque, l'apprenant se retrouve immergé dans une scène de familiarisation avec la Réalité Virtuelle, au sein de laquelle il va être amené à s'approprier la technologie (Figure 4.22). Cette scène amorce la transition de l'apprenant vers l'environnement virtuel, avant que le formateur ne lance le scénario de simulation.

Il va ainsi initier sa sensation de présence dans une scène neutre dans un premier temps, évitant ainsi de biaiser son attention sur le déroulement du scénario.

Lorsque le formateur lance un scénario de formation, l'apprenant se retrouve dans une nouvelle scène, au sein de laquelle il peut interagir avec des personnages virtuels.

Nous avons voulu tendre vers un niveau de réalisme mesuré chez ces personnages virtuels, afin de se prémunir d'éventuels effets de "vallée de l'étrange".

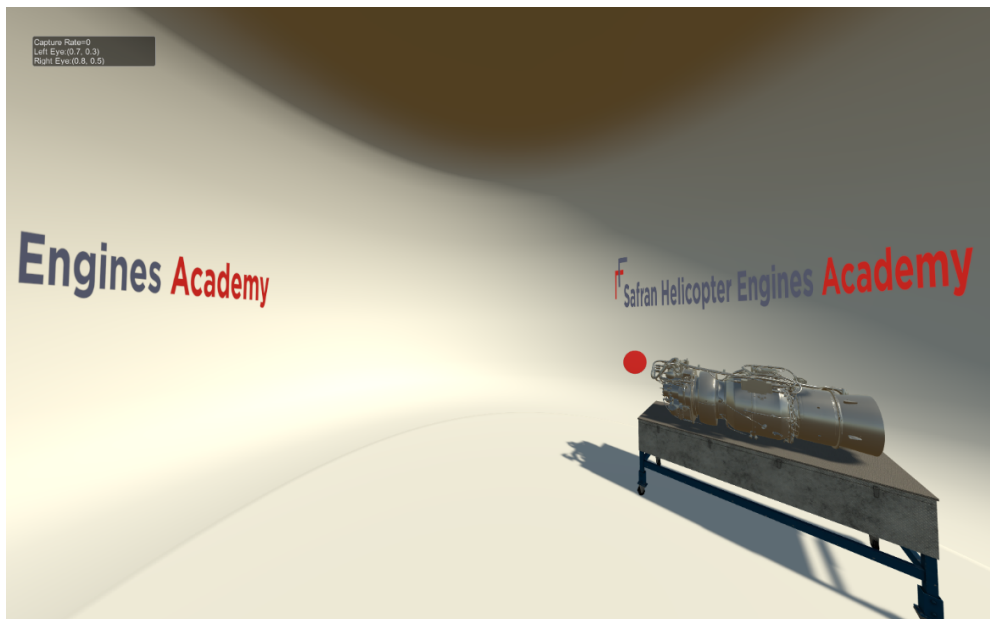


FIGURE 4.22: Prototype Holodeck Safran, scène de familiarisation



FIGURE 4.23: Exemple de personnages virtuels réalisés avec Morph3D

Les personnages ont été réalisés à partir de l'outil Morph3D ⁶ (Figure 4.23 ⁷). Leurs voix ont été pré-générées synthétiquement à partir de l'outil Voxygen ⁸ et la synchronisation labiale des personnages a été réalisée à partir de l'outil SALSA ⁹. Enfin, les animations des personnages ont été implémentées à partir de la bibliothèque d'animations Mixamo ¹⁰.

1.2. Panneau de contrôle formateur

Pour lancer les scénarios, le formateur va utiliser une interface lui permettant de les sélectionner et de les lancer.

Nous avons relevé que certains travaux de la littérature utilisaient un système de "Magicien d'Oz" pour s'affranchir de problématiques technologiques liées à l'intelligence artificielle et à la reconnaissance vocale. Afin d'éviter ces verrous, nous avons également opté pour cette solution.

6. Renommé depuis en *Tafi avatars* (<https://www.maketafi.com/>)

7. Source : <https://forum.unity.com/threads/released-morph-character-system-mcs-male-and-female.355675/page-44>

8. <https://voxygen.fr/>

9. Simple Automated Lip Sync Approximation : <https://crazyminnowstudio.com/>

10. <https://www.mixamo.com/#/>

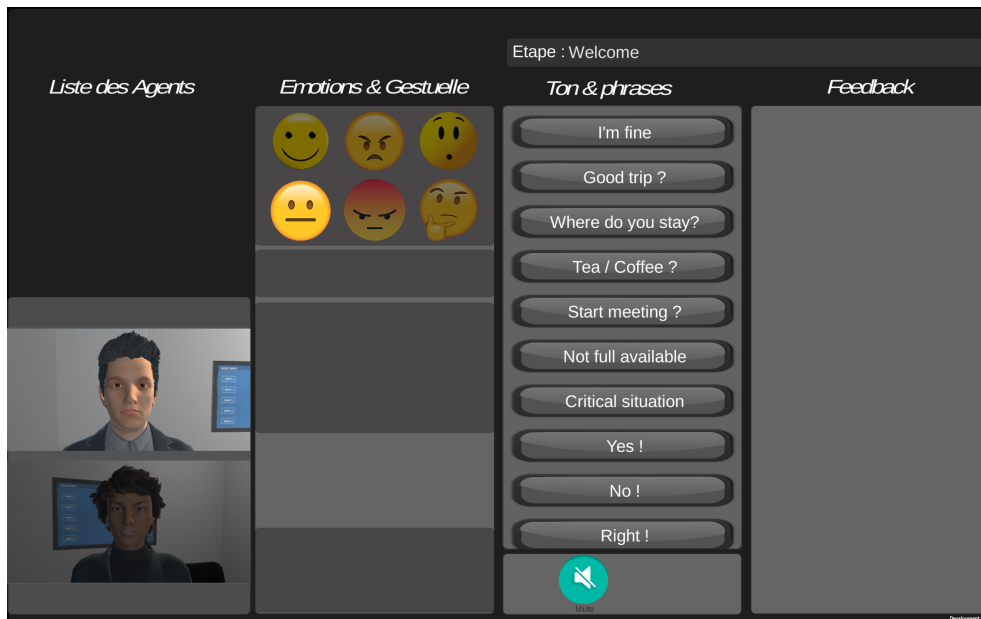


FIGURE 4.24: Panneau de contrôle formateur

Une fois la scène lancée, le formateur dispose d'une interface lui permettant de prendre le contrôle des différents personnages virtuels afin d'en modifier les émotions, les faire parler ou les déplacer (Figure 4.24).

Pour les personnages virtuels, 6 états émotionnels ont été identifiés avec les formateurs métiers : neutre (i.e. lorsque le personnage n'exprime aucune émotion), content, mécontent, en colère, surpris, sceptique (i.e. dubitatif).

Le formateur peut aussi passer à l'étape suivante d'un scénario en utilisant un bouton dédié. Lorsque c'est le cas, l'interface est mise à jour de sorte à n'afficher que les dialogues et actions permis pour cette étape du scénario.

Le panneau de contrôle est déployé sur une tablette, afin de permettre au formateur de se déplacer autour de l'apprenant et d'en faciliter l'observation pendant la simulation.

1.3. Scénarios

Le prototype implémente deux cas d'usage ciblant les compétences que nous avons identifié avec les formateurs : la négociation client et la communication d'équipe.

Pour les commerciaux, l'apprenant se retrouve dans une situation de négociation, au sein de la salle de réunion d'un client, dont les deux représentants commerciaux sont joués par deux personnages virtuels (Figure. 4.25). Il va faire face à leur mécontentement, devoir faire preuve d'écoute, de compréhension et être capable de proposer des solutions qui satisferont les clients. Il doit garder le contrôle de la relation, maintenir le lien et éviter une situation de rupture en répondant à la satisfaction du client, sans s'opposer aux objectifs de l'entreprise.

Dans ce scénario, les personnages virtuels sont initialement positionnés debout pour accueillir le commercial. Une fois les premiers échanges de présentation achevés, le formateur peut les faire s'asseoir autour de la table, par le biais d'un bouton du panneau de contrôle. À la fin de la réunion, il peut également les faire se lever pour reprendre leur position initiale, afin de conclure le scénario.

Pour les managers, l'apprenant va quant à lui se retrouver dans un atelier et devoir effectuer une communication difficile à une équipe d'une quinzaine de personnages virtuels (Figure 4.26). Dans ce scénario, l'apprenant est moteur de la communication. Il doit savoir s'adapter et réagir aux différentes réactions de l'équipe, qui va opter pour un comportement correspondant à la prestation de l'apprenant. Une zone réservée aux points de communication a donc été modélisée et des sons d'atelier ont été intégrés afin d'accroître le réalisme de la mise en situation.



FIGURE 4.25: Scène du scénario des commerciaux : la négociation client

Pour chaque scénario, le formateur dispose de différents propos qu'il peut déclencher selon l'émotion du personnage virtuel¹¹.

1.4. Suivi d'objets réels

Pour le scénario de négociation client, le système permet de synchroniser la chaise de l'apprenant et la table de la salle de réunion, avec leurs alter egos dans le monde réel. Après la phase introductive du scénario, il est important que l'apprenant puisse s'asseoir autour de la table avec les personnages virtuels.

Les formateurs métiers ont également souligné qu'il était nécessaire que l'apprenant puisse s'y accouder.

11. Les propos disponibles pour les scénarios sont mis à disposition en Annexes 6 et 7



FIGURE 4.26: Scène du scénario des managers : la communication d'équipe



FIGURE 4.27: VIVE Tracker fixé à la table (à gauche) et VIVE Controller fixé à la chaise (à droite)

La posture "accoudé de manière stable à la table" est en effet un comportement non-verbal à appliquer au cours de la mise en situation. L'apprenant transmet ainsi une attitude reflétant assurance et implication.

Pour synchroniser les positions de la chaise et de la table dans l'environnement virtuel, le système reconnaît un Vive Controller et un Vive Tracker¹², respectivement fixés à une chaise (Figure 4.27, droite) et à une table (Figure 4.27, gauche) dans le monde réel.

2. Expérimentations

2.1. Étude préliminaire

A l'issue de la réalisation du prototype, nous avons effectué une étude préliminaire afin d'établir si le système était suffisamment convenable pour pouvoir entreprendre des expérimentations sur des utilisateurs finaux¹³. Nous avons notamment cherché à évaluer si les utilisateurs se sentaient suffisamment présents au sein de l'environnement virtuel, ainsi que socialement face aux personnages virtuels.

Les résultats se sont montrés encourageants, les sujets s'étant sentis présents dans l'environnement virtuel. La présence sociale face aux personnages virtuels a en revanche montré des résultats plus mitigés.

Nous avons cependant choisi de conserver le prototype en l'état afin qu'il fasse l'objet d'expérimentations sur d'autres scénarios, chez des utilisateurs finaux, managers et commerciaux.

2.2. Objectifs des expérimentations sur des utilisateurs finaux

Nous avons donc expérimenté le prototype sur des utilisateurs finaux. La démarche visait ainsi à analyser la pertinence de l'outil en ciblant les objectifs suivants :

- Évaluer l'utilisabilité de l'outil.
- Confirmer les résultats des tests utilisateurs sur les sensations de présence, pour des scénarios métiers.
Au delà des mesures subjectives via des questionnaires de présence, nous avons également souhaité analyser la dynamique des échanges de manière objective. Pour cela, nous avons mesuré les temps de parole lors des mises en situation.
- Vérifier les symptômes de cybermalaises.

12. <https://www.vive.com/fr/vive-tracker/>

13. Cette étude préliminaire est disponible en Annexe 8

- Mesurer les apports d'apprentissage.
Afin de vérifier la pertinence pédagogique de l'outil, nous avons voulu observer si son utilisation révélait des apports en terme d'évaluations, de confiance en soi et de conscience de soi.
- Comparer le prototype en Réalité Virtuelle avec les jeux de rôle traditionnels.
Nous avons relevé que plusieurs auteurs soulignaient l'absence de travaux comparant des outils de formation aux jeux de rôle traditionnels. Pour analyser la pertinence de l'outil, nous avons donc souhaité l'évaluer en comparant le prototype à des jeux de rôles traditionnels.
- Évaluer l'intérêt de l'utilisation d'un visiocasque.
Là encore, l'état de l'art a permis de souligner l'absence de travaux évaluant la plus-value des visiocasques pour la formation aux compétences sociales. Nous avons donc cherché à évaluer l'outil en comparant le prototype utilisant un visiocasque, à une version projetable sur un écran via un rétroprojecteur.

2.3. Processus expérimental

Nous avons donc conduit deux expérimentations en collaboration avec Capgemini et Safran Helicopter Engines, sur des populations de managers et commerciaux. Nous avons choisi d'appliquer des processus expérimentaux différents pour nos deux populations.

Il est important de souligner que les sujets de chaque groupe étaient volontaires pour réaliser l'expérimentation.

Ils furent avertis que leurs données seraient anonymisées et utilisées uniquement à des fins expérimentales. Inclus dans la notice d'information, un formulaire informant du respect du Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD) fut rempli et signé par chacun d'entre eux.

Nous avons vu qu'établir des profils pouvait être nécessaire afin de traiter les résultats. Avant de remplir leurs premiers questionnaires, les sujets ont complété un petit formulaire renseignant des données propres à leur profil, parmi lesquelles : l'âge, le sexe, l'expérience métier, les troubles de la vision potentiels, ainsi que le vécu d'expériences précédentes en Réalité Virtuelle. Ces données ont été récoltées de sorte à pouvoir filtrer les résultats en fonction des profils.

2.3.1. Commerciaux : Réalité Virtuelle vs. jeux de rôle traditionnels

Sur la population des commerciaux, nous avons choisi d'analyser la pertinence pédagogique du prototype, en comparant le prototype et le scénario commercial à des jeux de rôle traditionnels. Des deux scénarios, celui des commerciaux était en effet le plus facilement applicable à un jeu de rôle présentiel, nécessitant la présence de deux acteurs seulement.

Pour chercher à atteindre les différents objectifs énoncés dans la sous-section précédente, nous avons donc élaboré et appliqué le processus expérimental présenté en Figure 4.28.

Les sujets ont été séparés en deux groupes : un groupe de traitement jouant une première fois le scénario sur le prototype (*Apprenants VR*, Figure 4.29 gauche) et un groupe de contrôle l'effectuant sur un jeu de rôle présentiel (*Apprenants JDR*, Figure 4.29 droite). La répartition a été effectuée de manière aléatoire, chaque sujet devant initialement piocher un identifiant, l'attribuant à un des deux groupes.

Nous avons pu effectuer ces expérimentations sur une population de 16 commerciaux.

Le groupe de traitement comprenait 8 sujets (5 femmes, 3 hommes) dont l'âge moyen était de 44 ans (± 5). Leur expérience commerciale moyenne était de 13 années (± 5).

Un seul d'entre eux avait déjà vécu une expérience en Réalité Virtuelle.

Le groupe de contrôle comptait quant à lui 8 sujets (4 femmes, 4 hommes) de 41 ans (± 8) de moyenne d'âge et ayant 12 ans (± 8) d'expérience commerciale en moyenne.

Avant leur passage sur la mise en situation, les sujets étaient invités à lire une notice d'information leur présentant l'expérimentation, ainsi que le scénario joué¹⁴.

14. Le scénario de la première mise en situation est disponible en Annexe 10

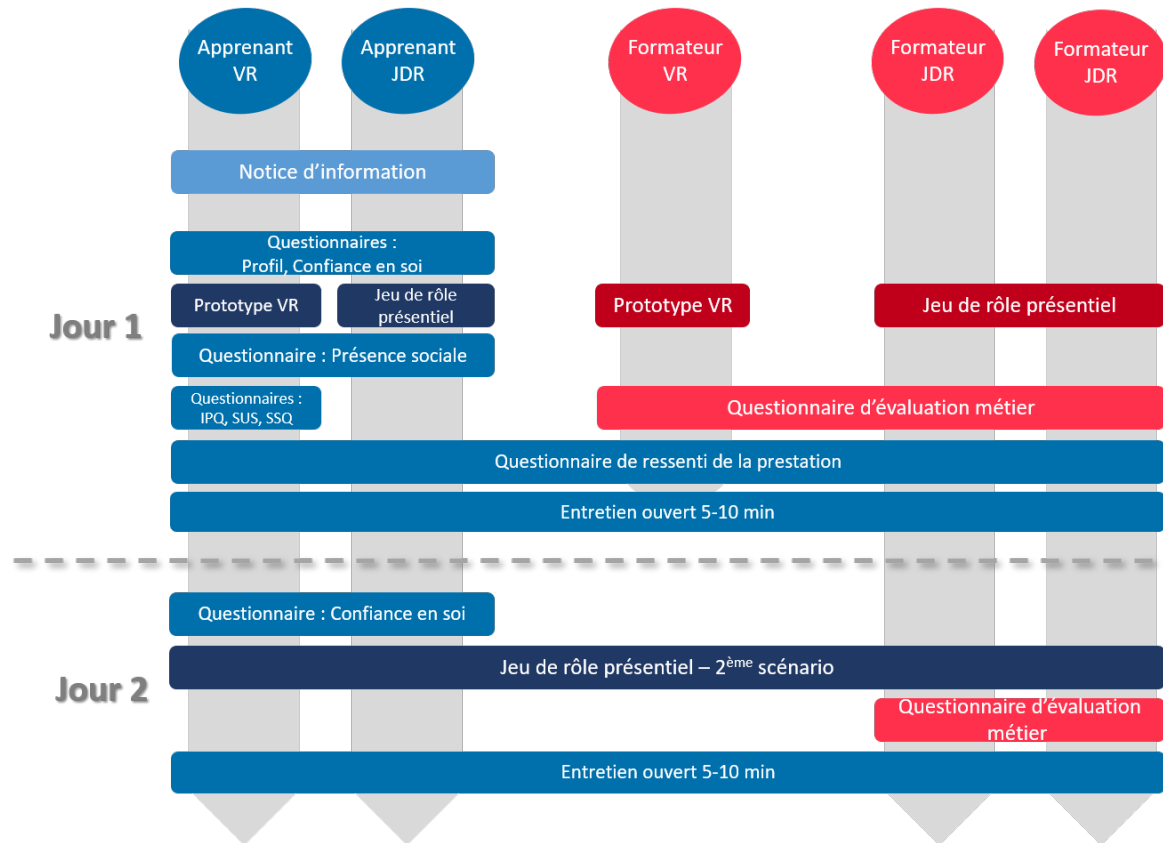


FIGURE 4.28: Processus expérimental commerciaux

Une fois le scénario lu, les sujets étaient libres de prendre le temps qu'ils jugeaient nécessaire afin de s'y préparer.

Ils pouvaient amener des notes avec eux s'ils le souhaitaient, ainsi que solliciter les formateurs pour des renseignements supplémentaires.

Afin de chercher à observer si le prototype en Réalité Virtuelle avait un impact sur les prestations ultérieures des sujets, chaque groupe était ensuite invité à revenir dans les jours suivants, pour effectuer un jeu de rôle présentiel supplémentaire sur un scénario différent. Élaboré par les formateurs métier, il était un peu plus délicat. Les sujets devaient également à faire face à un mécontentement client, portant sur des aspects plus pointilleux et exprimés de manière moins conciliante.

Là encore, un document décrivant le scénario était lu et préparé par les sujets avant de procéder à la mise en situation ¹⁵.

Les personnages des jeux de rôle présentiels étaient joués par deux formateurs métier. L'un des deux, que nous appelons *Formateur 1* (F_1), pilotait également les personnages virtuels pour chaque mise en situation en Réalité Virtuelle du groupe de traitement. Il s'agissait du même formateur pour chaque sujet, de sorte à limiter des biais dus à la manière de jouer les scénarios.

À noter que ce formateur avait eu au préalable une version du prototype, lui permettant de se familiariser avec le panneau de contrôle.

L'autre formateur se contentait quant à lui d'observer la prestation des sujets.

Afin de voir si des impacts sur la confiance en soi étaient perceptibles, les sujets devaient remplir un questionnaire (échelle de Likert) avant chaque mise en situation. Ce questionnaire a été réalisé avec les formateurs métier ¹⁶, en s'inspirant des travaux de Hook et al. [133] sur l'anxiété à la prise de parole en public.

15. Le scénario du second passage est disponible en Annexe 11

16. Le questionnaire est disponible en Annexe 17

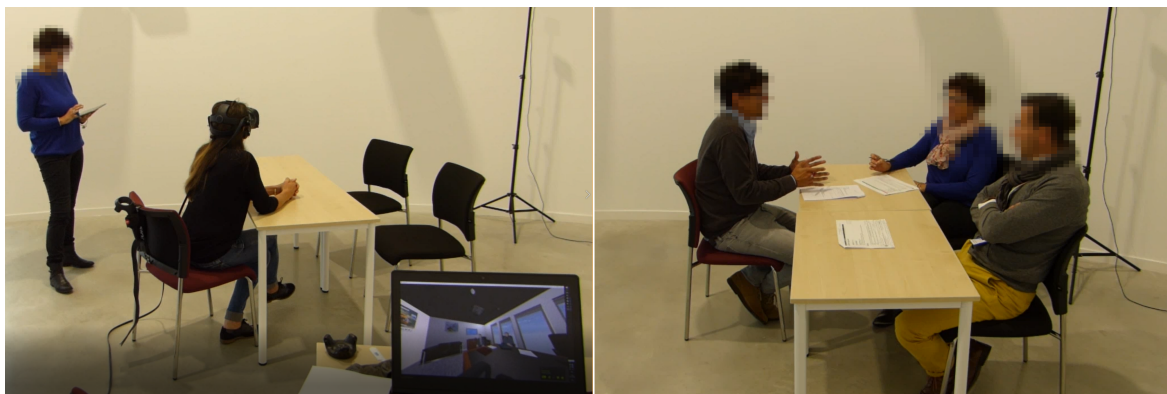


FIGURE 4.29: Expérimentations commerciales : groupe de traitement (gauche) et groupe de contrôle (droite)

Après la première mise en situation, les sujets du groupe de traitement remplissaient plusieurs questionnaires :

- un questionnaire de présence IPQ, afin de vérifier les résultats de l'étude préliminaire sur des scénarios métier et des utilisateurs finaux.
- un questionnaire SUS, afin d'évaluer l'utilisabilité de l'outil.
- un questionnaire SSQ, pour vérifier que l'outil ne procure pas de cybermalaises.

Les deux groupes remplissaient le questionnaire de présence sociale TPI, afin d'évaluer la présence sociale générée par le prototype par rapport à un jeu de rôle présentiel. Nous avons cependant réduit le questionnaire, en excluant les parties propres à la présence spatiale et à l'engagement, déjà analysés par le questionnaire IPQ.

Nous voulions ainsi comparer les résultats issus d'une mise en situation réelle, avec ceux provenant de l'utilisation du prototype en Réalité Virtuelle. L'objectif était de relever des écarts avec une situation réelle, de sorte à souligner les axes d'amélioration prioritaires de l'interaction sociale. Nous souhaitions également vérifier les résultats mitigés de l'étude préliminaire, en utilisant un autre questionnaire de présence sociale.

Après chaque mise en situation, les formateurs remplissaient une grille d'évaluation sans se concerter. En comparant les résultats des évaluations de la deuxième mise en situation avec ceux de la première, nous avons cherché à observer si des différences dans l'évaluation de la prestation étaient perceptibles. Élaborée par les formateurs métier, la grille d'évaluation décompose la mise en situation en 5 phases distinctes successives : *Introduction*, *Début de réunion (Meeting start)*, *Discussion*, *Proposition*, *Fin de réunion (Meeting closure)*¹⁷. Elle vise à évaluer différentes connaissances, habiletés et micro-compétences sur une échelle de notation pouvant aller de -2 à 4.

Suite à la première mise en situation, les sujets et les formateurs remplissaient un même questionnaire sur le ressenti de la prestation. En comparant les écarts entre les réponses des instructeurs et celles des sujets, nous avons cherché à observer si le prototype impactait la conscience de soi.

Synthétisant la grille d'évaluation métier que nous venons de mentionner, ce questionnaire comprenait 20 questions (échelle de Likert) relevant du ressenti de la prestation¹⁸.

Là encore, les formateurs ne se concertaient pas en remplissant le questionnaire, de sorte à récolter leurs ressentis subjectifs respectifs.

Nous avons vu qu'effectuer des entretiens oraux pouvait être pertinent dans le but d'obtenir des informations pouvant être difficilement acquises autrement.

Les sujets étaient donc invités à échanger librement sur leur ressenti, au cours d'un entretien ouvert en compagnie des formateurs.

Pour chaque sujet, l'entretien débutait par la même instruction, leur demandant de communiquer tout le feedback qu'ils jugeraient pertinent au sujet de l'expérience qu'ils venaient de vivre.

17. La grille d'évaluation est disponible en Annexe 12

18. Le questionnaire de ressenti de la prestation est disponible en Annexe 13

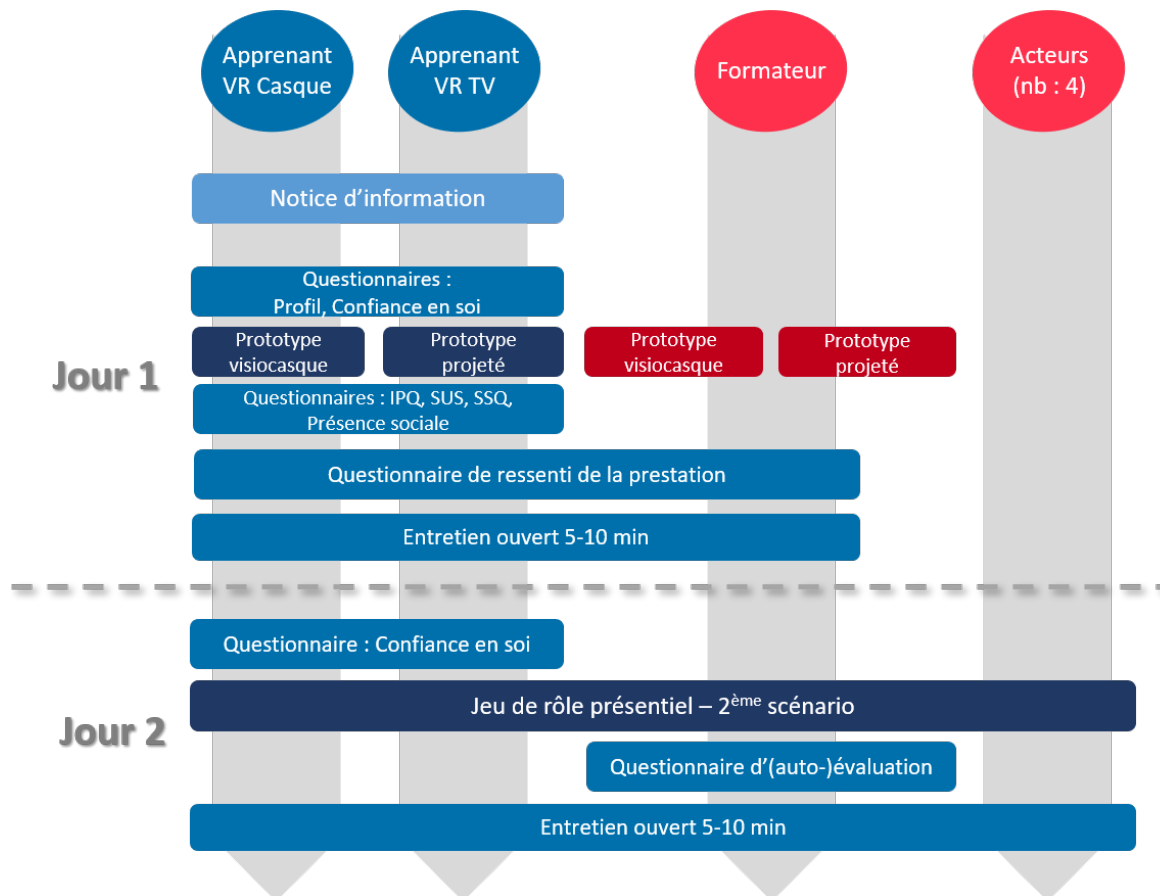


FIGURE 4.30: Processus expérimental managers

Les formateurs en profitaient également pour les interroger sur l'intérêt que pouvait (ou non) présenter l'outil, ainsi que sur les jeux de rôle traditionnels auxquels ils ont eu l'occasion de participer dans le passé.

Les retours ont été notés et traités manuellement.

2.3.2. Managers : visiocasque vs. écran projeté

Pour la population des managers, nous avons choisi d'analyser la plus-value de l'utilisation d'un visiocasque par rapport à une version projetée.

Le scénario semblait notamment plus pertinent du fait du nombre important de personnages virtuels à confronter. L'idée étant de faire ressentir à l'apprenant une sensation de masse, de faire face à une foule. Analyser les différences potentielles en fonction de l'interface visuelle nous paraissait donc intéressante.

Pour chercher à atteindre les différents objectifs présentés précédemment, en fonction de l'interface visuelle utilisée, nous avons mis au point et appliqué le processus expérimental présenté en Figure 4.30.

Les sujets ont été divisés en deux groupes jouant le même scénario : un groupe utilisant un visiocasque (*Apprenant VR Casque*, Figure 4.31 gauche) et un groupe utilisant une version projetée sur un mur incurvé via deux rétroprojecteurs (*Apprenant VR TV*, Figure 4.31 droite). Comme pour les commerciaux, la répartition a été établie aléatoirement. Avant l'expérimentation, les sujets piochaient un identifiant les attribuant à un des groupes.

Les expérimentations ont été conduites sur une population de 12 managers.

Le groupe utilisant le visiocasque comprenait 6 sujets (1 femme, 5 hommes) de 39 ans (± 5) d'âge moyen, comptant en moyenne 12.5 années (± 7) d'expérience en management.



FIGURE 4.31: Expérimentations managers : groupe visiocasque (gauche) et groupe écran projeté (droite)

Un seul d'entre eux avait déjà vécu une expérience en Réalité Virtuelle.

Le groupe utilisant la version projetée comptait également 6 sujets de 42 ans (± 7) d'âge moyen et ayant 13 ans (± 5) d'expérience managériale moyenne.

À l'instar des commerciaux, les sujets managers commençaient l'expérimentation en lisant une notice d'information, ainsi qu'un texte présentant le scénario¹⁹. Les sujets pouvaient prendre le temps qu'ils jugeaient nécessaire pour préparer la mise en situation, tout comme choisir d'amener des notes avec eux. Le formateur était là aussi disponible pour tout complément d'information si le sujet le souhaitait.

Au cours de cette première mise en situation, le formateur pilotait les personnages virtuels via le panneau de contrôle.

Les sujets revenaient dans les jours suivants afin de d'effectuer une seconde mise en situation sur un scénario différent²⁰.

Ce second scénario, imaginé par le formateur métier, était jugé plus délicat à réaliser. Les sujets devaient annoncer à une équipe de petite taille, une diminution au sein de leurs effectifs.

Cette nouvelle mise en situation s'effectuait en présentiel, face à 4 acteurs ayant des expériences diverses au sein de l'entreprise. Chacun d'entre eux avait comme consigne de jouer un seul et même rôle pour chaque sujet, correspondant à un profil spécifique préalablement identifié par le formateur²¹. Le formateur observait quant à lui l'échange et intervenait pour mettre fin à la mise en situation, lorsqu'elle dépassait la dizaine de minutes et qu'il jugeait les échanges suffisants.

Tout comme pour les commerciaux, un questionnaire de confiance en soi a été réalisé avec les formateurs métiers²². Il s'inspire aussi des travaux de Hook et al. [133] sur l'anxiété à la prise de parole en public.

Là encore, les sujets devaient remplir ce questionnaire avant chaque mise en situation, de sorte à chercher à voir si des différences d'impacts sur la confiance en soi étaient perceptibles en fonction de l'interface visuelle utilisée.

Les sujets des deux groupes durent également remplir les mêmes questionnaires que le groupe de traitement des commerciaux après la première mise en situation : un questionnaire de présence IPQ, un questionnaire d'utilisabilité SUS, un questionnaire de cybermalaises SSQ et un questionnaire de présence sociale TPI réduit (parties présence spatiale et engagement exclues).

Pour cette population, l'objectif visait à observer dans quelle mesure l'interface visuelle utilisée impactait ces différents éléments.

Après chaque mise en situation, le formateur remplissait un questionnaire d'évaluation à partir de son ressenti de la prestation, de sorte à pouvoir comparer les deux mises en situation.

19. Le scénario de la première mise en situation est disponible en Annexe 14

20. Le scénario du second passage est disponible en Annexe 15

21. Les rôles joués par les acteurs sont disponibles en Annexe 16

22. Le questionnaire est disponible en Annexe 18



FIGURE 4.32: Vive Tracker à la ceinture d'un sujet manager du groupe projeté

Nous voulions chercher à observer si des différences étaient perceptibles, selon l'interface visuelle utilisée.

Élaborée avec les formateurs métier, cette grille comprenait 20 questions (échelle de Likert) au sujet du ressenti de la prestation²³.

Comme pour les commerciaux, ce questionnaire a également été rempli par les sujets lors de la première mise en situation. L'objectif était là aussi de chercher à observer si l'interface visuelle utilisée impactait la conscience de soi, en comparant les ressentis du formateur avec ceux des sujets.

Pour le scénario des managers, l'occupation de l'espace face à l'auditoire est une métrique importante identifiée par les formateurs.

Au cours de la première mise en situation, les sujets des deux groupes étaient équipés d'un Vive Tracker fixé à une ceinture placée autour de leur taille (Figure 4.32). Nous voulions suivre ainsi la position des sujets au cours de l'exercice, pour observer d'éventuelles différences de l'occupation de l'espace, lorsque les sujets utilisaient un visiocasque.

Le système traçait la position des sujets dans un fichier, en enregistrant celle du Vive Tracker toutes les 0,5 secondes.

Pour chaque sujet, la scène était positionnée au même endroit et orientée dans la même direction. Les stations de base Vive²⁴ ont été fixées sur des trépieds qui ne furent pas déplacés jusqu'à la fin des expérimentations. La délimitation de l'aire d'action n'a été effectuée qu'une fois, avant l'expérimentation.

Enfin, à l'instar des commerciaux, les sujets étaient conviés à échanger en toute liberté sur leur ressenti, lors d'un entretien ouvert après chaque mise en situation. Là encore, l'entretien débutait par la même question pour chaque sujet, demandant de communiquer tout le feedback jugé pertinent sur l'expérience qu'ils venaient de vivre. Le formateur interrogeait également les sujets sur l'intérêt potentiel de l'outil, ainsi que sur leur avis concernant les jeux de rôle traditionnels. Les retours ont aussi été notés et traités manuellement.

2.3.3. Précautions générales

Les sujets utilisant une version visiocasque du prototype en Réalité Virtuelle étaient équipés d'un visiocasque HTC Vive, intégrant un serre-tête de fixation et une interface acoustique stéréophonique (Figure 4.33²⁵).

23. Le questionnaire est disponible en Annexe 19

24. Dispositifs utilisés pour le suivi du visiocasque en temps réel

25. Source : <https://www.vive.com/eu/vive-deluxe-audio-strap/>



FIGURE 4.33: Visiocasque HTC VIVE, équipé d'un serre-tête *Deluxe Audio Strap*

L'écart inter-pupillaire des sujets fut mesuré au préalable, puis le visiocasque fut réglé en fonction de leur morphologie.

Chaque mise en situation a été filmée. Les vidéos anonymisées des premières mises en situation ont été annotées manuellement afin de mesurer les temps de parole. Nous avons ainsi voulu observer si des différences de dynamique étaient observables entre chaque groupe.

Enfin, les sujets étaient isolés lors des expérimentations, de sorte à se prémunir d'éventuels biais d'observations, .

2.4. Utilisabilité

Afin d'analyser la pertinence de conception du prototype, nous proposons d'analyser dans un premier temps son utilisabilité.

En suivant les travaux de Brooke et al. [113], nous avons calculé un score d'utilisabilité pour chaque utilisateur, sur les différents scénarios du prototype.

Par le biais de ce score, Brooke et al. proposent de calculer des scores d'utilisabilité. Nous cherchons donc à nous inscrire dans la même démarche.

Nous calculons ainsi trois scores moyens, un pour les commerciaux en Réalité Virtuelle, un pour les managers utilisant le visiocasque et un pour les managers sur la version projetée.

Pour interpréter ces résultats, nous proposons de positionner nos travaux selon les grades lettrés définis par Sauro [30].

2.4.1. Résultats d'utilisabilité du prototype commerciaux

Avec un score moyen de 82.5 (± 13.02) (Figure 4.34), le prototype pour les commerciaux a obtenu un excellent score d'utilisabilité, le classant au rang A défini par Sauro.

2.4.2. Résultats d'utilisabilité des prototypes managers : visiocasque et projeté

Les deux versions du prototype managers ont également recueilli d'excellents scores d'utilisabilité.

La version visiocasque a reçu un score moyen de 87.92 (± 9.54), alors que celle projetée a obtenu un score moyen de 84.16 (± 11.9) (Figure 4.34).

2.4.3. Discussions sur l'utilisabilité

Les scores d'utilisabilité ont montré des résultats satisfaisants, tant pour le prototype commerciaux, que pour les deux versions de celui destiné aux managers.

Ces résultats indiquent que les utilisateurs ont convenablement pu utiliser l'outil.

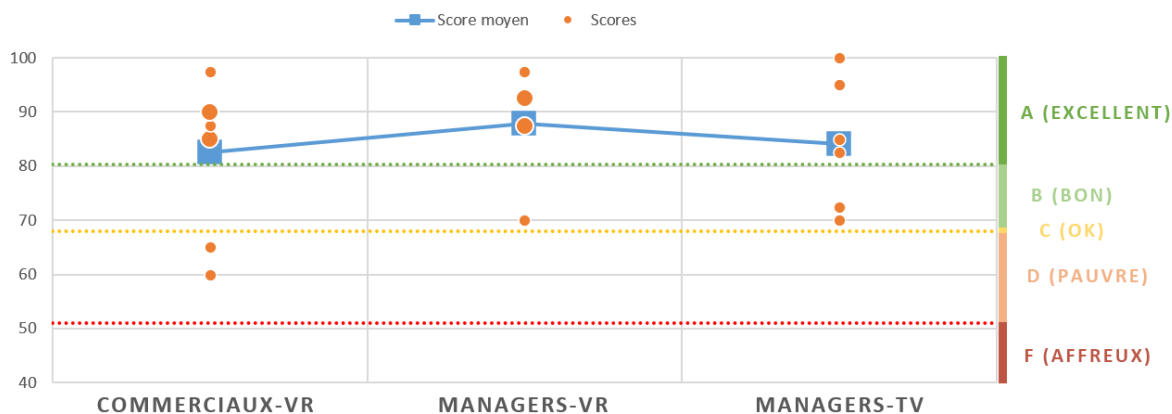


FIGURE 4.34: Scores d'utilisabilité (SUS)

Ils permettent de valider les principaux choix de conception du prototype, tant du point de vue fonctionnel, que matériel (interfaces utilisées).

Néanmoins, on peut observer que deux sujets commerciaux ont pauvrement noté l'utilisabilité du prototype (intervalle D, notes de 51 à 68).

Le premier d'entre eux (score de 65), a subi à un problème provenant d'une erreur du formateur. Celui-ci s'est trompé en changeant d'étape du scénario via le panneau de contrôle. Cet aléa a amené une incohérence dans le déroulement du scénario, générant un blocage et des incompréhensions lors de son déroulement. Afin de régler ce problème, le prototype a du être réinitialisé et repositionné sur l'étape adéquate du scénario. Les réponses au questionnaire d'utilisabilité rempli par le sujet tendent à confirmer cette hypothèse. Le sujet a en effet attribué les scores de :

- 1/4 à l'item (#1) "*Je pense que je pourrais apprécier d'utiliser ce système fréquemment.*"
- 3/4 à l'item (#4) "*Je pense que j'aurais besoin d'aide d'une personne technique pour être capable d'utiliser ce système.*"

Au cours de l'entretien, le sujet a également souligné avoir trouvé les temps de réponse gênants.

Les réponses de cet utilisateur permettent de mettre en avant l'importance de l'aisance du formateur avec le panneau de contrôle.

Le second sujet (score de 60) n'a quant à lui fait face à aucun problème d'utilisation. Cependant, son questionnaire de profil indique qu'il s'agit d'un des sujets les plus expérimentés et chevronnés.

De ce fait, le sujet a opté pour des stratégies peu communes par rapport au reste du groupe de traitement. Il a utilisé une stratégie de positionnement que le scénario ne gérait pas. Il s'est très rapidement montré dominant dans l'échange, usant stratégiquement de questions pour remettre en cause et chercher à déstabiliser le client. Face à ce comportement, le formateur a éprouvé des difficultés pour faire répondre les personnages virtuels, générant ainsi des échanges lents et parfois peu cohérents.

Lorsqu'on analyse ses réponses, on constate que le sujet a été gêné par ces manques de complexité et de dynamisme. Il a ainsi attribué un faible score (1/4) aux items "*Je pense que je pourrais apprécier d'utiliser ce système fréquemment.*" (#1) et "*Je me suis senti très confiant en l'utilisation de ce système*" (#9).

Ses retours au cours de l'entretien tendent à confirmer cela. Soulignant le manque de réactivité et les réponses bateau des personnages virtuels, il a indiqué ne pas avoir réellement saisi l'objectif du scénario. Il a de lui-même exprimé avoir été gêné par la dominance de ses interlocuteurs dans l'échange, alors qu'il utilise habituellement des questions comme outil stratégique.

Ces observations posent donc ouvertement la question de la pertinence de l'outil pour un utilisateur expérimenté.

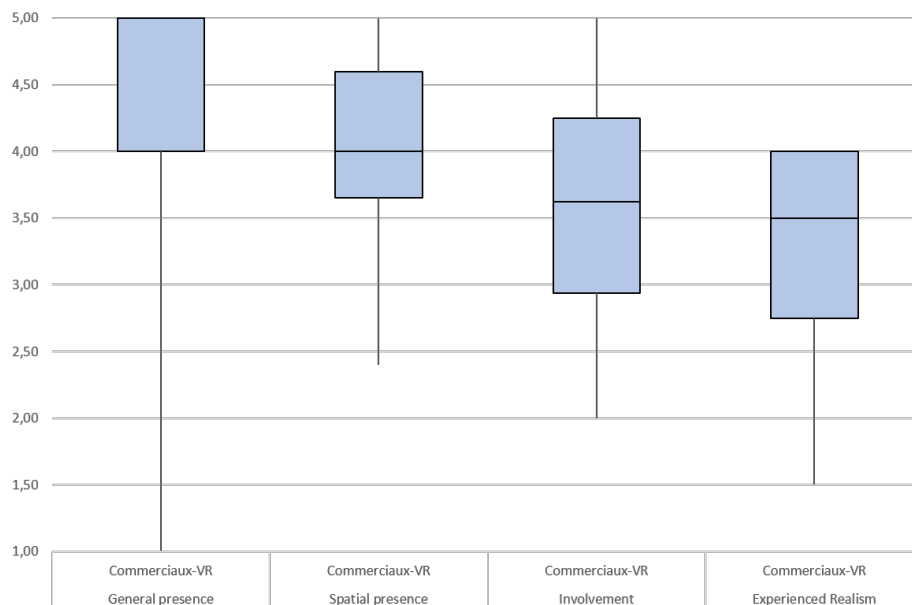


FIGURE 4.35: Résultats des questionnaires de présence (IPQ) des commerciaux

2.5. Sensations de présence et de présence sociale

Afin d'établir si les choix d'interfaces et de conception de l'environnement virtuel sont pertinents, nous proposons d'analyser la sensation de présence. Nous avons précédemment vu qu'une sensation de présence convenable était une condition requise pour un système d'apprentissage en Réalité Virtuelle.

Conformément à l'usage qu'en font leurs auteurs, nous avons calculé les moyennes des réponses aux différents groupes pour le questionnaire de présence IPQ. Nous analysons ainsi les moyennes concernant la présence générale, la présence spatiale, l'engagement et le réalisme.

Nous nous sommes également conformés à l'usage des auteurs du questionnaire de présence sociale TPI, en calculant le score total des réponses concernant l'interaction parasociale, l'interaction passive interpersonnelle, l'interaction active interpersonnelle, la richesse sociale et le réalisme social.

2.5.1. Résultats de la sensation de présence pour les commerciaux

Les réponses aux questionnaires de présence pour les commerciaux ont permis de produire les résultats présentés en Figure 4.35.

On observe des scores majoritairement au dessus de la note médiane (3.00) pour les quatre groupes d'items : présence générale (*General presence*, $Me = 4.00$), présence spatiale (*Spatial presence*, $Me = 4.00$), engagement (*Involvement*, $Me = 3.63$) et réalisme ressenti (*Experienced Realism*, $Me = 3.50$).

Les résultats sur la sensation de présence montrent donc que les sujets commerciaux se sont convenablement sentis présents dans l'environnement virtuel.

2.5.2. Résultats de la sensation de présence sociale pour les commerciaux, entre Réalité Virtuelle et jeu de rôle présentiel

Les résultats des questionnaires de présence sociale peuvent être consultés en Figure 4.36.

Le groupe passé sur le jeu de rôle présentiel semble montrer de meilleurs résultats pour chaque groupe d'items.

Cependant, comme le montre la Table 4.36, seule la différence concernant l'interaction parasociale s'est révélée statistiquement significative lors des tests, avec une taille de l'effet importante.

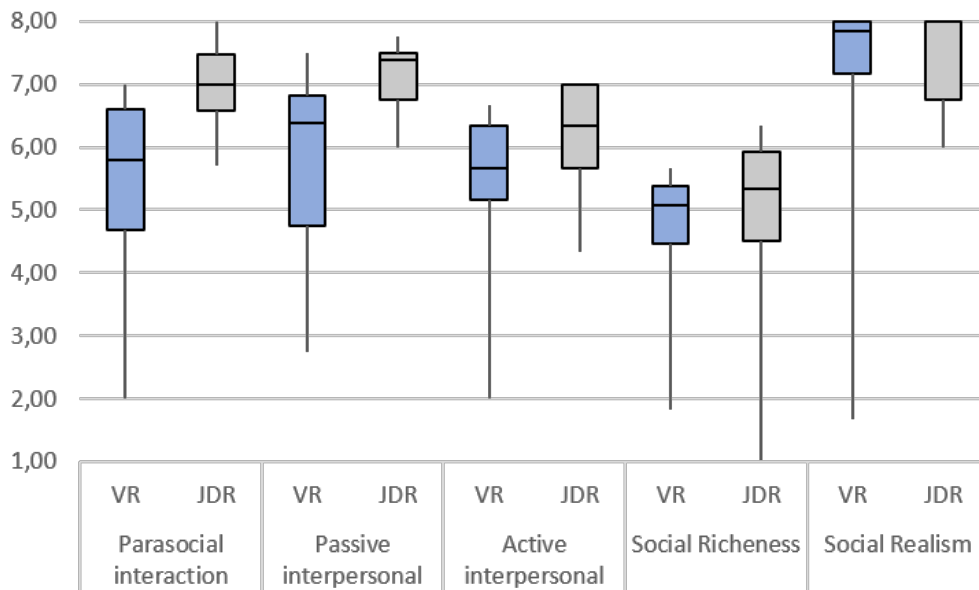


FIGURE 4.36: Résultats des questionnaires de présence sociale (TPI) des commerciaux

TABLE 4.1: Résultats des questionnaires de présence sociale (TPI) et des tests statistiques (Wilcoxon-Mann-Whitney) pour les commerciaux

Item	Groupe	Médiane (<i>Me</i>)	Résultat du test	Différence	Taille de l'effet
Parasocial interaction	VR JDR	5.79 7.00	$U = 10.5, z = -2.33, p < 0.05$	Significative	$r = 0.58$
Passive interpersonal	VR JDR	6.38 7.38	$p > 0.05$	Non significative	
Active interpersonal	VR JDR	5.67 6.33	$p > 0.05$	Non significative	
Social richness	VR JDR	5.08 5.33	$p > 0.05$	Non significative	
Social realism	VR JDR	8.00 8.00	$p > 0.05$	Non significative	

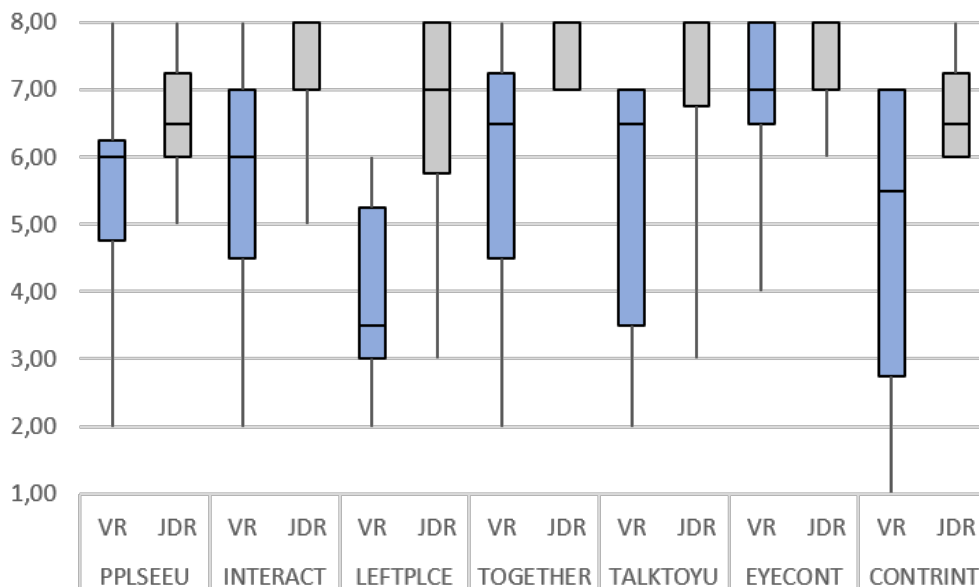


FIGURE 4.37: Résultats des questions propres à l'interaction parasociale des commerciaux

TABLE 4.2: Résultats des questions propres à l'interaction parasociale et des tests statistiques (Wilcoxon-Mann-Whitney) pour les commerciaux

Item	Groupe	Médiane (<i>Me</i>)	Résultat du test	Différence	Taille de l'effet
PLSEEU	VR	6.00	$p > 0.05$	Non significative	
	JDR	6.50			
INTERACT	VR	6.00	$p > 0.05$	Non significative	
	JDR	7.00			
LEFTPLCE	VR	3.50	$U = 9.0, z = -2.49,$ $p < 0.05$	Significative	$r = 0.62$
	JDR	7.00			
TOGETHER	VR	6.50	$p > 0.05$	Non significative	
	JDR	8.00			
TALKTOYU	VR	6.50	$U = 12.5, z = -2.11,$ $p < 0.05$	Significative	$r = 0.53$
	JDR	8.00			
EYECONT	VR	7.00	$p > 0.05$	Non significative	
	JDR	8.00			
CONTRINT	VR	5.50	$p > 0.05$	Non significative	
	JDR	6.50			

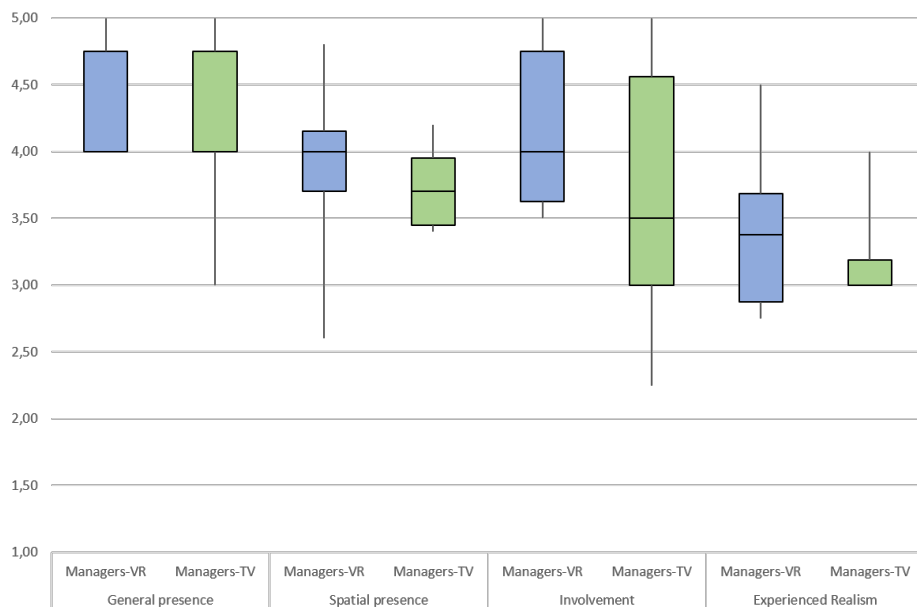


FIGURE 4.38: Résultats des questionnaires de présence (IPQ) des managers

Face à ce résultat, nous avons analysé les réponses provenant de items relatifs à l'interaction parasociale (Figure 4.37). Ils semblent tous indiquer de meilleurs résultats pour le groupe passé sur le jeu de rôle présentiel.

Les tests statistiques se sont avérés significatifs pour les items LEFTPLCE et TALKTOYU, avec une taille de l'effet importante (Table 4.2). Ils correspondent respectivement à la sensation d'avoir été "présent au même endroit que l'interlocuteur et dans le monde réel" et à la sensation que "l'interlocuteur semblait parler directement".

Les résultats semblent donc indiquer que les commerciaux se sont sentis moins socialement présents sur le prototype, qu'en jeu de rôle présentiel. Ils montrent notamment que la sensation d'être en présence au même endroit qu'un interlocuteur, s'adressant directement à eux, est significativement inférieure sur le prototype.

2.5.3. Résultats de la sensation de présence pour les managers, entre version visiocasque et version projetée

Les réponses des managers aux questionnaires de présence IPQ ont produit les résultats présentés en Figure 4.38.

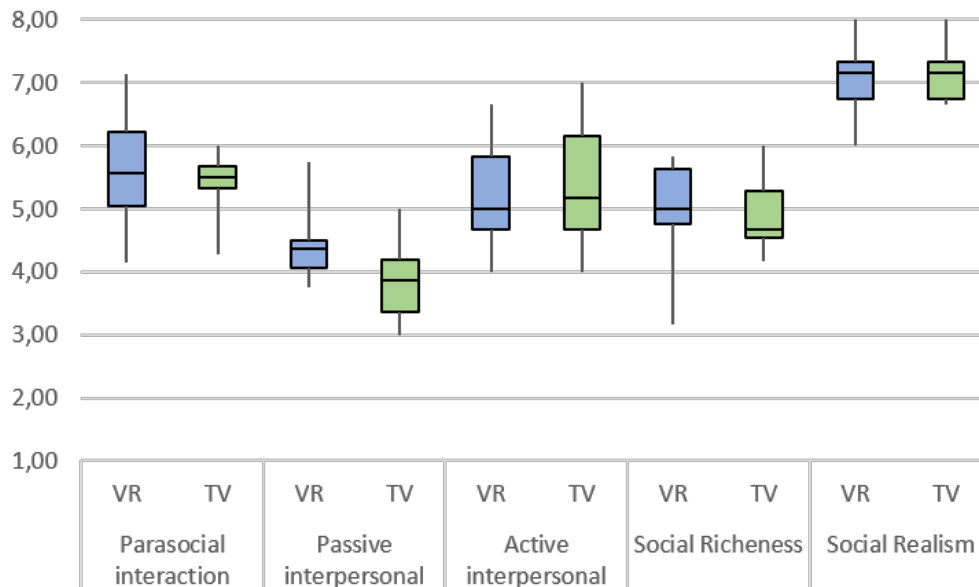


FIGURE 4.39: Résultats des questionnaires de présence sociale (TPI) des managers

La présence spatiale (*Spatial presence*), l'engagement (*Involvement*) et le réalisme ressenti (*Experienced Realism*) semblent indiquer des résultats légèrement meilleurs pour le groupe ayant utilisé le visiocasque.

Cependant, les tests statistiques n'ont pas permis d'établir ces différences comme significatives (Wilcoxon-Mann-Whitney, $p > 0.05$).

2.5.4. Résultats de la sensation de présence sociale pour les managers, entre version visiocasque et version projetée

Les résultats des questionnaires de présence sociale sont présentés en Figure 4.39.

Bien qu'une légère différence soit observable pour l'interaction passive interpersonnelle, aucune différence significative n'a été soulignée lors des tests statistiques (Wilcoxon-Mann-Whitney, $p > 0.05$).

Nous avons cependant voulu analyser les réponses provenant des items relatifs à l'interaction passive interpersonnelle (Figure 4.40).

Les items FACEEXPR et TONEVOIC semblent avoir obtenu de meilleurs résultats pour le groupe utilisant le visiocasque.

Néanmoins, ces différences ne se sont pas non plus montrées significatives lors des tests statistiques (Wilcoxon-Mann-Whitney, $p > 0.05$).

Les résultats ne montrent donc pas de différences significatives sur la sensation de présence sociale pour les managers, en fonction de l'interface visuelle utilisée. Seule l'interaction passive interpersonnelle (expressions faciales, ton de la voix, etc.) semble moins perçue par les sujets de la version projetée.

2.5.5. Discussions sur la sensation de présence

Les résultats des questionnaires de présence sont venus confirmer ceux établis lors de l'étude préliminaire.

Le scénario des commerciaux, utilisant le même environnement et les mêmes personnages, a en effet aussi montré des résultats satisfaisants. L'étude préliminaire avait souligné des résultats moyens pour le ressenti du réalisme de l'environnement virtuel.

Les résultats du scénario commerciaux tendent à montrer des résultats légèrement meilleurs.

Nous avons observé la même amélioration pour l'engagement sur la population des commerciaux.

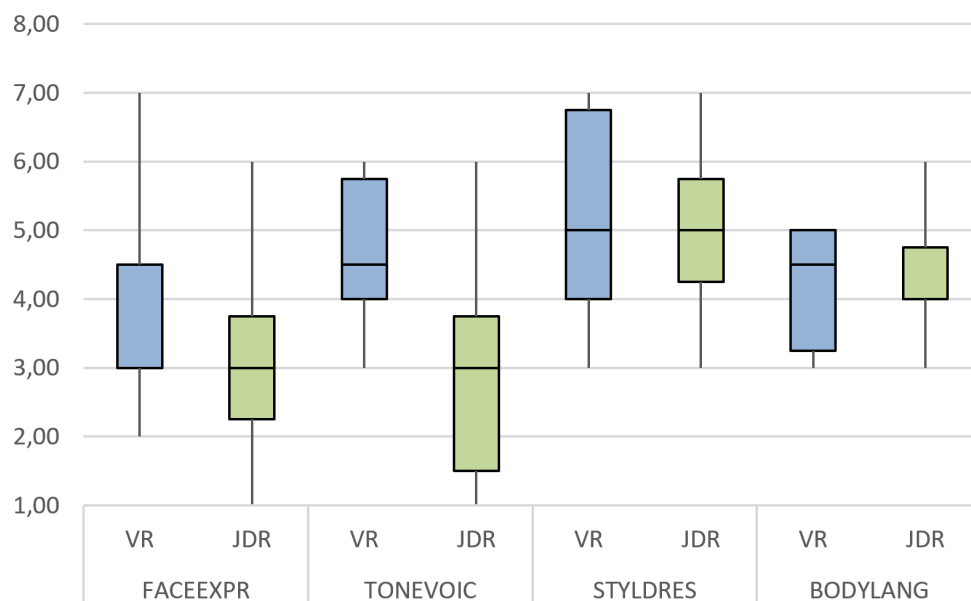


FIGURE 4.40: Résultats des questions propres à l'interaction passive interpersonnelle des managers

Il est donc possible que le fait d'avoir un environnement virtuel correspondant mieux au scénario puisse avoir amélioré le ressenti du réalisme de l'environnement virtuel, tout comme favorisé l'engagement des sujets. Cependant, la taille de l'échantillon (8 sujets) est trop faible pour en tirer la conclusion.

Pour les managers, les résultats des questionnaires ont permis d'observer que les sujets ayant utilisé le visiocasque semblent s'être sentis plus présents que ceux de la version projetée. Néanmoins, les tests statistiques n'ont pas permis d'établir de différences significatives sur un groupe d'items en particulier.

La taille des échantillons (6 sujets dans chaque groupe), ne permet pas de conclure. Des études supplémentaires, sur des échantillons plus importants seraient nécessaires pour confirmer les résultats.

Les feedbacks recueillis lors des entretiens oraux viennent étayer tous ces résultats.

Pour les deux interfaces visuelles, une grande partie des managers ont d'eux même exprimé le fait de s'être senti présent dans l'environnement virtuel (67% du groupe visiocasque et 100% du groupe projeté).

Certains sujets des deux populations ont d'ailleurs souligné la rapidité de cet effet (33% des commerciaux, 33% des managers du groupe projeté).

Un tiers des managers ayant utilisé le visiocasque a d'ailleurs souligné la représentativité de la scène virtuelle et son réalisme sonore.

Cependant, toujours un tiers d'entre-eux a indiqué avoir été gêné par le câble du visiocasque. Pour résoudre ce problème, des solutions techniques devraient être envisagées (e.g. visiocasque sans fil, système de guidage du câble, etc.).

Même si les résultats nous ont permis de relever cette amélioration matérielle nécessaire, il semble que les sujets se soient généralement sentis présents dans l'environnement virtuel. Ces résultats satisfaisants, s'ils venaient à être validés sur un échantillon plus large, pourraient confirmer la pertinence des différents choix de conception concernant l'environnement virtuel et les interfaces utilisées. Comme nous l'avons vu précédemment, les effets de la sensation de présence sur l'apprentissage nous permettraient d'envisager ainsi que l'outil présente des apports en terme d'apprentissage.

2.5.6. Discussions sur la sensation de présence sociale

Si les résultats sur la sensation de présence se sont montrés satisfaisants, ceux des questionnaires de présence sociale se sont montrés plus mitigés.

Ils n'ont permis de valider la pertinence de l'outil que de manière partielle et soulèvent surtout des questionnements et des pistes d'amélioration importantes à apporter :

- Améliorer le panneau de contrôle magicien d'Oz et les comportements non-verbaux des personnages virtuels.

Les résultats issus des expérimentations commerciaux, comparant le prototype à un jeu de rôle présentiel, ont permis d'identifier une différence significative pour l'interaction parasociale.

Lorsque nous avons analysé les différents items concernés, deux d'entre eux se sont montrés significativement inférieurs pour le groupe de commerciaux en Réalité Virtuelle :

- la sensation d'avoir été *présent au même endroit que l'interlocuteur et dans le monde réel* (LEFTPLCE) ;
- la sensation que *l'interlocuteur semblait parler directement* (TALKTOYU).

Pour ces deux éléments, il est possible que l'utilisation du panneau de contrôle Magicien d'Oz, générant des temps de réponse, ait eu un impact sur les résultats.

Il est également possible que l'absence de suivi du regard par les personnages virtuels aient également impacté l'item TALKTOYU.

Les autres items ont reçu des résultats inférieurs pour le groupe en Réalité Virtuelle, sans toutefois comporter de différences significatives, probablement à cause de la taille de l'échantillon (8 sujets). Pour approfondir ces résultats, des études supplémentaires sur des échantillons plus importants sont nécessaires.

Les entretiens oraux viennent confirmer la nécessité l'amélioration des comportements non verbaux des personnages. Ils ont permis de relever certaines lacunes ayant potentiellement influé sur la sensation de présence sociale.

La moitié des sujets managers de chaque groupe a par exemple souligné le caractère synthétique des voix et librement exprimé avoir éprouvé des difficultés à identifier le personnage virtuels prenant la parole. Ceux-ci utilisaient tous la même voix et aucune animation ne les distinguait des autres personnages, juste avant de prendre la parole (e.g. bras levé, mouvement vers l'avant, etc.). Améliorer la pluralité de leurs voix et ajouter des animations spéciales peut être une solution. L'utilisation des voix pré-enregistrées non synthétiques peut aussi être nécessaire.

Enfin, un nombre important de sujets commerciaux ont exprimé avoir trouvé les personnages trop rigides. Leurs animations devraient donc être un axe des travaux d'amélioration à considérer.

- Améliorer la qualité des voix utilisées et des interfaces acoustiques utilisées.

Enfin, nous n'avons pas relevé de différences significatives pour les résultats de présence sociale des managers, comparant le prototype visiocasque à sa version projetée.

Cependant, on observe une légère différence pour l'interaction passive interpersonnelle. Les résultats de la version projetée semblent inférieurs à ceux de la version visiocasque. En analysant les items concernés, nous avons observé des différences potentielles sur l'observation des changements de tonalités vocales et celle des expressions faciales. Pour ces deux items, les résultats semblent inférieurs pour la population ayant utilisé la version projetée.

Les différences observées dans la perception des changements de tonalités vocales peut avoir différentes origines.

Il est possible que cela provienne des voix pré-générées synthétiquement, qui ne possèdent qu'une faible prosodie.

Il est aussi probable que l'interface acoustique utilisée influe sur la perception des changements de tonalité. Pour la version projetée, la diffusion du son était assurée en monophonique, par les hauts parleurs des rétroprojecteurs. En revanche, pour la version visiocasque, les sujets étaient équipés du casque stéréophonique installé sur le serre-tête. Si ces observations venaient à être confirmées, il serait intéressant d'équiper les utilisateur de la version projetée avec un casque stéréophonique lors de nouvelles expérimentations, de sorte à vérifier si on observe des améliorations.

- Étudier la perception des expressions faciales émotionnelles selon l'interface visuelle utilisée.

Les résultats sur la perception des expressions faciales émotionnelles soulèvent une interrogation : est-ce que l'utilisation d'une interface visuelle projetée modifie la perception des expressions faciales émotionnelles ?

Là encore, des expérimentations supplémentaires sont nécessaires afin de vérifier ou d'infirmar cette hypothèse. Si elle venait à être confirmée, il serait alors nécessaire de prendre en considération l'interface visuelle utilisée dans la manière de dessiner l'expression.

Enfin, nous avons aussi analysé la dynamique des interactions en étudiant l'équilibre des temps de parole, entre les sujets et leurs interlocuteurs²⁶.

Les résultats ont également révélé les limites des échanges avec les personnages virtuels. Il semble cependant compliqué d'atteindre un dynamisme proche de celui des jeux de rôles présentsiels, d'autant plus dans le scénario des commerciaux, où l'apprenant doit être plus passif et à l'écoute pendant l'échange.

Néanmoins, l'amélioration des personnages virtuels, de leur réactivité et de leurs propos disponibles paraît là encore nécessaire pour essayer de limiter ces différences.

2.6. Cybermalaises

Afin de garantir que l'outil d'apprentissage en Réalité Virtuelle ne génère pas d'incohérences sensorimotrices, nous proposons d'étudier la présence de cybermalaises chez les sujets. Nous avons vu précédemment que le ressenti de symptômes de cybermalaises nuisait à la pertinence de l'outil, en empêchant une utilisation adaptée pour certains de ses utilisateurs potentiels.

2.6.1. Méthodologie pour l'étude des cybermalaises

Comme nous l'avons précédemment mentionné, Kennedy et al. proposent d'exploiter les résultats de leur questionnaire SSQ en calculant un score de sévérité global (*SSQ Total Score*) et un score de sévérité pour chaque groupe de symptômes. Pour traiter les résultats des questionnaires SSQ, nous cherchons à nous inscrire dans la même démarche que les auteurs du questionnaire, en calculant ces scores.

Nous avons voulu vérifier si la répartition des scores récoltés révélait des anomalies. Au vu des tailles d'échantillons restreintes, nous avons choisi d'effectuer un test de Kolmogorov-Smirnov [172, 173].

Ce test d'hypothèse permet de comparer une fonction de répartition avec celle d'un échantillon, afin de déterminer si les deux fonctions suivent la même loi de répartition. Pour ce faire, le test nécessite de quantifier les distances (D) entre les deux fonctions de répartition et de les comparer à un seuil critique ($D_\alpha(n)$).

Ce seuil est défini en fonction d'une taille d'échantillon (n) et d'une probabilité de rejet (α)²⁷. Si la distance est supérieure au seuil critique, alors la fonction de répartition de l'échantillon ne suit pas la même loi que celle de la fonction de référence.

Ainsi, en comparant la fonction de répartition de l'échantillon de référence de l'échelle SSQ²⁸ fournie par Kennedy et al. [109], il est possible de déterminer si la fonction de répartition de nos échantillons est anormale. Un tel résultat indique que les scores de cybermalaises obtenus sont anormaux.

Lorsque c'est le cas, nous cherchons donc à analyser les différents profils d'apprenant afin d'étudier les origines de cet effet.

2.6.2. Résultats des cybermalaises du prototype commerciaux

Lorsqu'on observe les résultats des réponses des commerciaux au questionnaire SSQ (Figure 4.41), on remarque que le Score total SSQ (*SSQ Total Score*) est légèrement supérieur à celui de l'échantillon de référence. Cette observation est plus marquée lorsqu'on observe les résultats des groupes de symptômes (Nauséeux (N (*Nausea*)), Oculomoteurs (O (*Oculomotor*)), et de Désorientation (D (*Disorientation*)).

Les tests de Kolmogorov-Smirnov ont révélé une distribution anormale des résultats du Score Total SSQ, ainsi que pour chaque groupe de symptômes (Figure 4.42).

Afin de chercher des pistes d'explication, nous avons produits des tests supplémentaires en séparant nos sujets selon s'ils présentaient des troubles de la vision ou non (Figure 4.42).

26. L'étude des temps de parole est disponible en Annexe 20

27. Les seuils critiques du test de Kolmogorov-Smirnov ont été reproduits en Annexe 21

28. Voir Table 1.2 disponible en Annexe 1 (p.236)

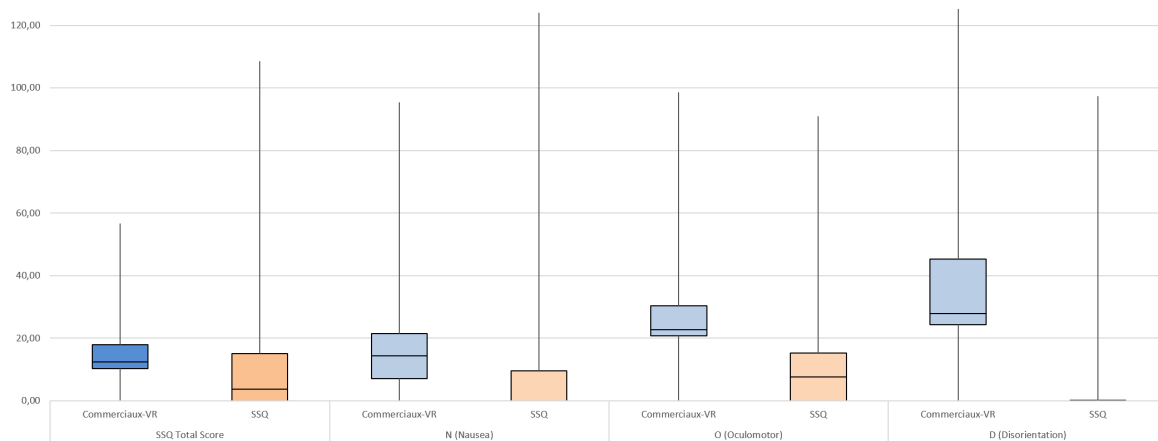


FIGURE 4.41: Résultats des questionnaires SSQ pour les commerciaux

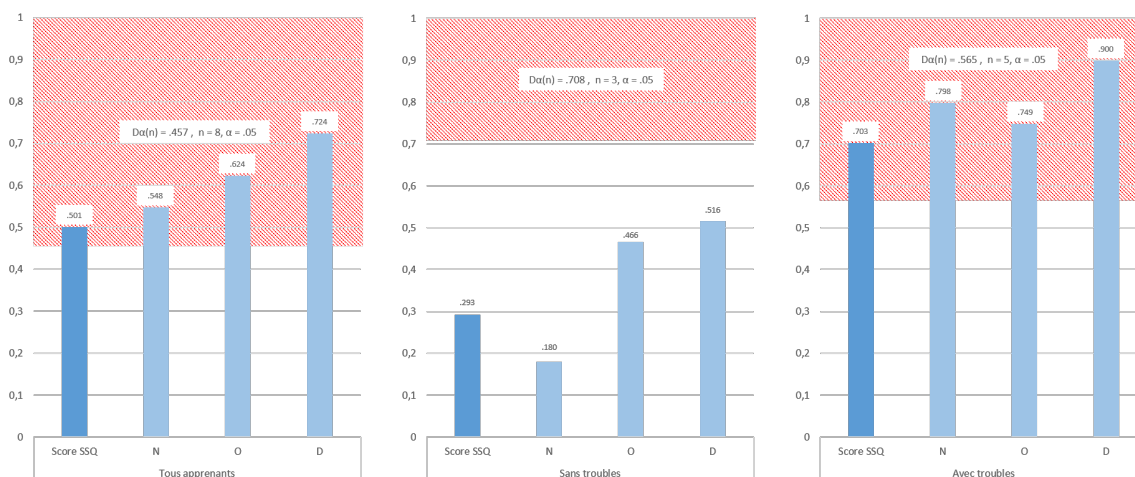


FIGURE 4.42: Résultats des tests de Kolmogorov-Smirnov pour les résultats des questionnaires de cybermalaises (SSQ) des commerciaux

Ces informations furent indiquées par les sujets au moment de remplir leur questionnaire de profil. L'échantillon des sujets présentant des troubles de la vision se composait ainsi de 5 sujets, pour lesquels un ou plusieurs troubles furent recensés ²⁹.

Ces nouveaux tests ont montré une distribution anormale du Score total SSQ, et de tous les groupes de symptômes, pour les sujets présentant des troubles de la vision. Les résultats des sujets sans troubles de la vision n'ont en revanche pas montré de distribution anormale.

Les résultats indiquent donc que les cybermalaises ont été anormalement ressentis, notamment par les sujets présentant des troubles de la vision.

2.6.3. Résultats des cybermalaises pour les managers, entre version visiocasque et version projetée

Que les sujets aient utilisé la version visiocasque ou la version projetée, les résultats des réponses aux questionnaires SSQ (Figure 4.43) semblent globalement similaires à ceux de l'échantillon de référence, pour le Score total SSQ (*SSQ Total Score*) et les groupes de symptômes Nauséux (*N (Nausea)*) et Oculomoteurs (*O (Oculomotor)*).

Seuls les résultats du groupe des symptômes de désorientation (*D (Disorientation)*) semblent supérieurs pour le groupe ayant utilisé la version visiocasque. Cependant, ces résultats n'ont pas montré de différences statistiquement significatives (Wilcoxon-Mann-Whitney, $p > 0.05$).

29. La liste des troubles de la vision rapportés par chaque sujet du groupe commerciaux est disponibles en Annexe 22

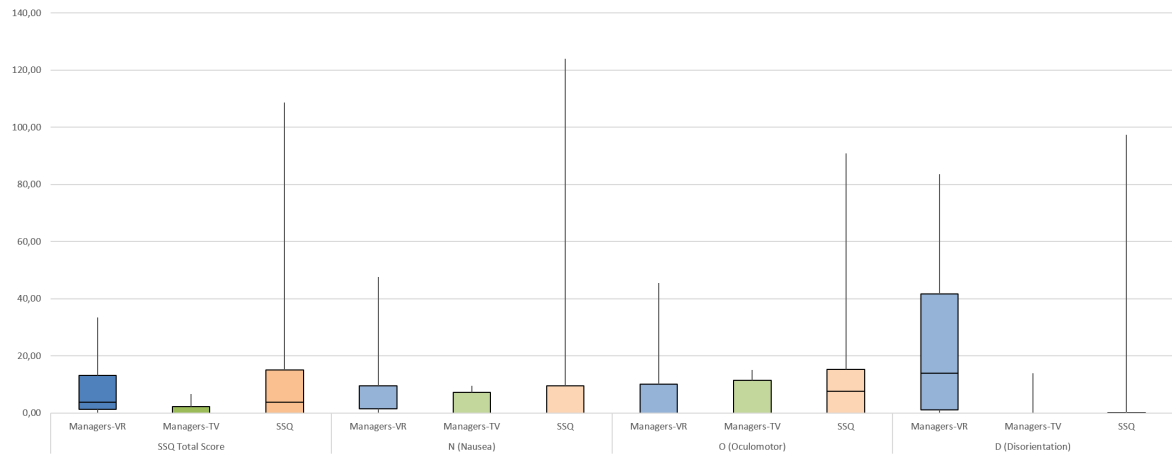


FIGURE 4.43: Résultats des questionnaires de cybermalaises (SSQ) pour les managers

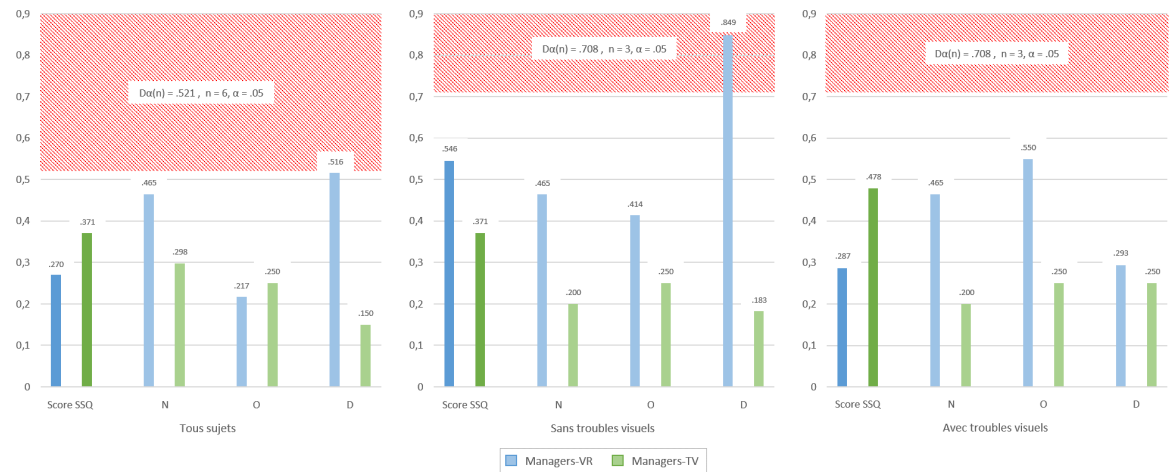


FIGURE 4.44: Résultats des tests de Kolmogorov-Smirnov pour les résultats des questionnaires de cybermalaises (SSQ) des managers

Si les sujets semblent avoir légèrement plus ressentis de symptômes Nauséeux (N) et de Désorientation (D) avec le visiocasque, nous ne pouvons pas garantir qu'il ne s'agisse pas d'un effet de hasard. Pour les deux groupes, les tests de Kolmogorov-Smirnov (Figure 4.44) n'ont pas révélé de distribution anormale des résultats, tant pour le Score total SSQ que pour les groupes de symptômes.

Cependant, comme pour les commerciaux, nous avons produit des tests supplémentaires en séparant nos sujets selon s'ils présentaient des troubles de la vision ou non (Figure 4.44). Pour chaque version du prototype (visocasque et projetée), 3 sujets présentaient un trouble de la vision³⁰.

Pour les sujets présentant des troubles de la vision, des nouveaux tests ont montré une distribution anormale des symptômes de Désorientation (D) seulement (.849, $D\alpha(n) = .708$, $n = 3$, $\alpha = .05$). Les résultats des symptômes concernés sont présentés en Table 4.3.

Ces résultats indiquent donc que les symptômes de Désorientation (D) ont été anormalement ressentis par les sujets utilisant un visiocasque et présentant des troubles de la vision.

2.6.4. Discussions sur les cybermalaises

Les résultats des questionnaires de cybermalaises se sont montrés nuancés, ne permettant pas de garantir totalement la pertinence de conception sur cet aspect là.

30. La liste des troubles rapporté par chaque sujet du groupe managers est disponibles en Annexe 22

TABLE 4.3: Réponses* des managers du groupe visiocasque, pour les symptômes de Désorientation du questionnaire de cybermalaises (SSQ)

Symptômes	Sujets (identifiants)		
	MVR3	MVR6	MVR7
Troubles d'accomodation	0	1	0
Nausées	0	0	0
Tête comprimée	1	1	1
Vision floue	0	1	0
Tête qui tourne (yeux ouverts)	0	0	2
Tête qui tourne (yeux fermés)	0	0	1
Vertiges	0	0	2

* 0 :Non, 1 :Léger, 2 :Modéré, 3 :Sévère

Le prototype pour les commerciaux semble avoir généré anormalement plus symptômes. Les tests de Kolmogorov-Smirnov ont montré une anormalité dans la distribution de ces scores.

Les deux versions du prototype managers (visiocasque et projetée) ne montrent pas de Scores Totaux SSQ anormaux, par rapport à ceux de l'échantillon de référence. Les tests de Kolmogorov-Smirnov n'ont en effet pas montré d'anormalités pour les deux groupes.

Nous avons effectué des tests supplémentaires en scindant chaque population, selon si les sujets présentaient ou non des troubles de la vision.

Les résultats des commerciaux ont montré des résultats anormaux pour les sujets comportant des troubles de la vision uniquement.

Cependant, nous n'avons pas observé le même phénomène pour les managers. Pour ceux-ci, les résultats des sujets comportant des troubles de la vision n'ont pas soulevé d'anormalité, tant pour la version visiocasque, que celle projetée. En revanche, bien que tous les autres résultats n'aient pas montré d'anormalité, un résultat contraire est observable chez les sujets de la version visiocasque et n'ayant pas de troubles d'ordre visuel. Pour le groupe de symptômes de désorientation, leurs résultats se sont en effet révélés anormaux.

Différentes explications permettent de formuler les hypothèses suivantes :

— Les populations testées ne seraient pas représentatives.

De par leur faible taille (6 à 8 sujets), il est en effet possible que les groupes de managers et commerciaux ne soient pas représentatifs. Effectuer des études supplémentaires sur des populations plus importantes peut permettre de lever cette incertitude.

— Les troubles de la vision peuvent avoir eu une incidence sur les cybermalaises.

Les résultats permettent de supposer que l'anormalité des scores de cybermalaises proviennent des sujets comportant des troubles de la vision.

Vérifier ou infirmer cette hypothèse sur un échantillon plus important, puis chercher à résoudre ces problématiques, représentent un enjeux important. Un outil d'apprentissage pertinent doit en effet éviter d'exclure un part de la population d'apprenants, aussi minime soit-elle.

Si cette hypothèse venait à être confirmée, nous recommanderions donc d'implémenter une version additionnelle pouvant être projetée ou diffusée sur un écran, afin de garantir un outil de formation pertinent en Réalité Virtuelle.

— L'utilisation du visiocasque et/ou l'environnement virtuel pourraient avoir un effet sur les symptômes de Désorientation.

Les résultats des managers utilisant le visiocasque ont révélé une anormalité des résultats pour les symptômes de Désorientation.

Des études supplémentaires sont là encore nécessaires sur un échantillon plus large. Il est notamment nécessaire de déterminer si l'apparition de ces symptômes est liée à l'environnement virtuel et/ou aux interfaces visuelles utilisées.

2.7. Évolution des évaluations

Afin d'analyser la pertinence pédagogique, nous avons étudié l'évolution des évaluations effectuées par les formateurs. Nous avons cherché à observer si une plus-value était perceptible, i.e. que les évaluations s'amélioreraient pour les différents groupes de sujets.

Comme nous l'avons vu précédemment, une compétence s'infère à partir des habiletés observées chez l'apprenant. Les savoirs (savoir, savoir-faire, savoir-être) se déduisent ainsi des habiletés de l'apprenant, qui elles sont observables. Lorsqu'on se penche sur les grilles d'évaluation et questionnaires élaborés avec les formateurs³¹, on observe qu'ils évaluent tant des habiletés que des savoirs.

Nous proposons donc d'analyser les items selon si ils correspondent à des déductions de savoirs ou à l'observation d'habiletés réceptives, décisionnelles ou émettrices. Nous avons ainsi regroupé les items selon les savoirs et habiletés correspondants, que ce soit pour les commerciaux (Figure 4.45) ou les managers (Figure 28.2).

Pour les commerciaux, la grille d'évaluation était remplie par deux formateurs. Au moment de traiter ses résultats, il est nécessaire de prendre en compte cette particularité. En effet, rien ne garantit que les variables qualitatives ordinales ont été perçues de la même manière par les différents formateurs. Nous avons donc souhaité analyser au préalable si l'interprétation de la grille était la même pour ces deux formateurs. Si tel est le cas, nous considérons les évaluations comme variables quantitatives et nous calculons la moyenne arithmétique des deux évaluations de chaque item. En revanche, si la manière de remplir la grille diffère entre les deux formateurs, nous traitons leurs évaluations comme deux variables qualitatives différentes.

Afin de vérifier si cette interprétation nous permet de traiter nos données comme des valeurs quantitatives ou qualitatives, nous avons proposé et appliqué une méthodologie³².

Les résultats de cette étude ont montré que les façons de noter étaient suffisamment différentes pour devoir différencier les notations de nos deux formateurs. Nous avons donc dû traiter leurs évaluations comme deux variables qualitatives différentes.

Nous avons ainsi calculé les score moyens de chaque sujet pour chaque formateur, proportionnellement au score maximum possible. Nous les avons regroupé par savoirs et habiletés, afin d'avoir un aperçu global des évaluations.

Pour les managers, un seul instructeur indiquait son ressenti à partir d'un questionnaire. Afin d'éviter de transformer ces données qualitatives en données quantitatives, nous n'avons pas calculé de score, mais directement comparé chaque item du questionnaire.

Nous avons analysé toutes les différences observées sur les résultats des évaluations. Disponible en Annexe 25, cette étude nous a permis d'identifier certaines différences que nous proposons de reprendre et de discuter dans les paragraphes suivants.

2.7.1. Résultats des commerciaux, entre Réalité Virtuelle et jeu de rôle présentiel

Les résultats obtenus ont permis d'observer de nombreuses différences entre les deux groupes.

Cependant, seules les évaluations du groupe passé sur le prototype en Réalité Virtuelles (groupe VR) se sont avérées significativement inférieures pour le savoir-faire social *Présentation et échanges*, avec une taille de l'effet importante (Wilcoxon-Mann-Whitney : $U = 12.0$, $z = -2.0479$, $p < 0.05$, $r = 0.51$).

Nous avons néanmoins observé d'autres différences qui méritent d'être relevées.

Les évaluations du savoir-être *Gestion du stress* d'un formateur semblent diminuer pour le groupe VR alors que celles du groupe passé sur le jeu de rôle présentiel (groupe JDR) semblent diminuer. Ses évaluations semblent également supérieures pour le groupe VR lors du premier passage.

Les évaluations de certains savoir-faire sociaux tels que l'*Attitude de leadership*, la *Force de conviction* et la *Maîtrise de la situation* semblent s'améliorer pour le groupe JDR, alors que ce n'est pas le cas pour le groupe VR.

31. Voir Annexe 12

32. La méthodologie et l'analyse de l'interprétation de la grille d'évaluation par les formateurs sont disponibles en Annexe 23

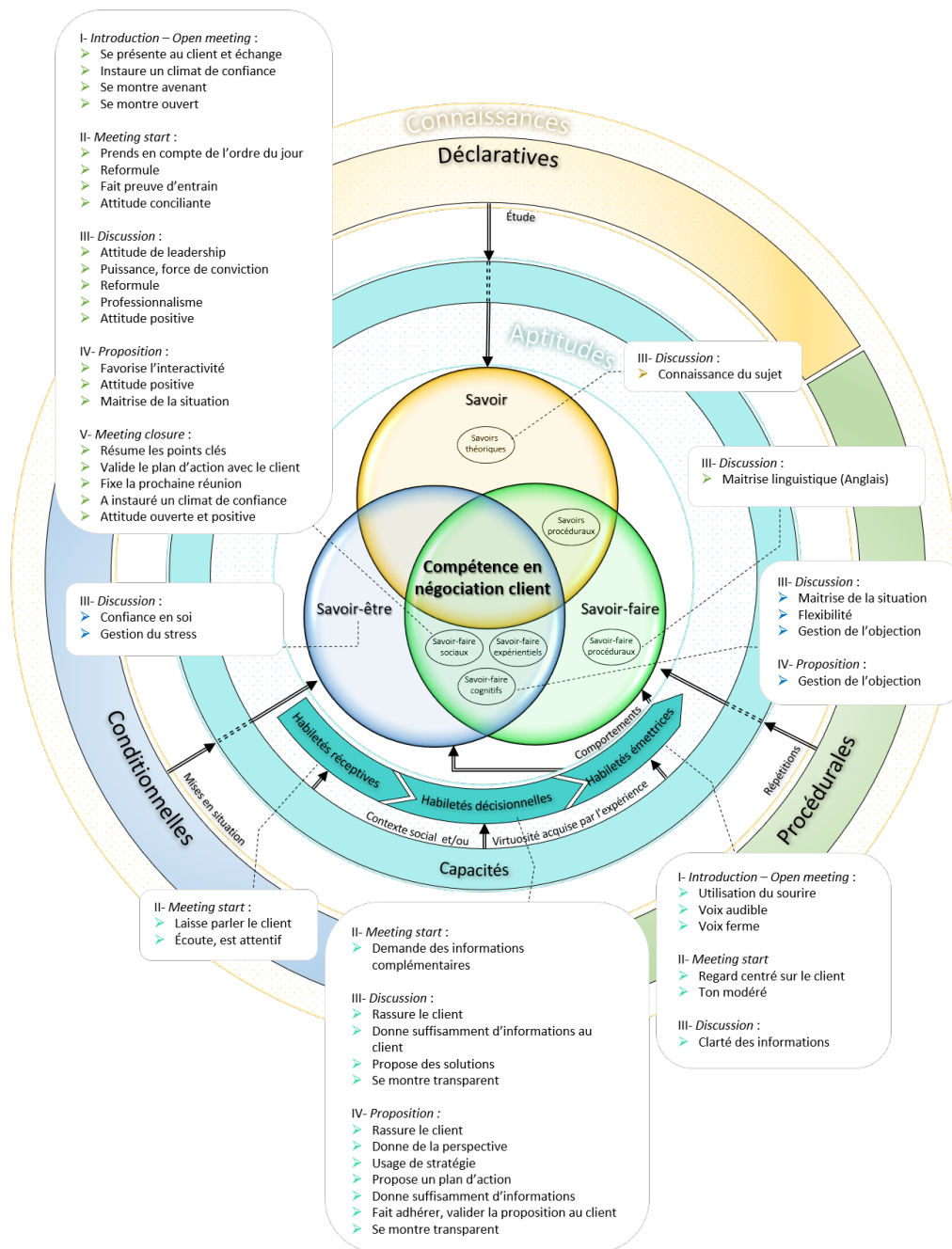


FIGURE 4.45: Distribution des items du formulaire détaillé d'évaluation des commerciaux, en fonction des différents savoirs et habiletés

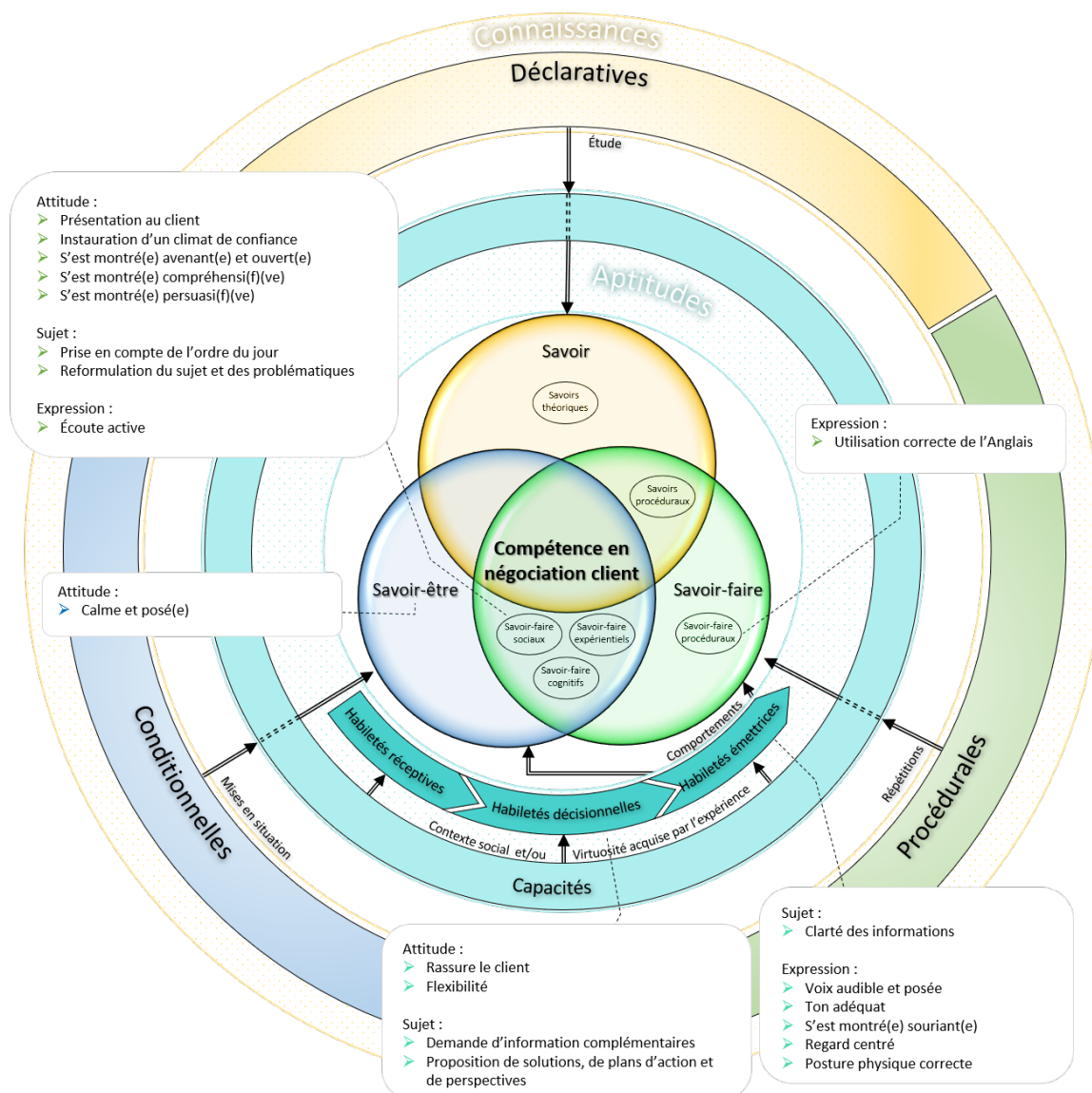


FIGURE 4.46: Distribution des items du questionnaire de ressenti des managers, en fonction des différents savoirs et habiletés

Lors de la phase d'introduction de la mise en situation, les évaluations de plusieurs savoir-faire sociaux du groupe VR (*Présentation et échanges, Climat de confiance, Avenant*) semblent s'améliorer. Dans le même temps, celles du groupe JDR ne semblent pas évoluer.

Enfin, nous avons observé que les évaluations de certaines habiletés émettrices semblaient s'améliorer pour le groupe VR, sans que ce soit le cas pour le groupe JDR. Ce fut notamment le cas pour le fait de se montrer *Souriant* ou celui d'avoir un *Regard centré sur le client*. De plus, les évaluations de ces habiletés semblent inférieures pour le groupe VR lors du premier passage.

Les résultats montrent donc que les sujets ont été jugés significativement moins efficaces dans leur échanges initiaux lors de leur passage sur le prototype. Sans que ce soit significatif, les autres résultats laissent supposer que les sujets sont jugés moins efficaces lors de la phase de présentation sur le prototype. Ils semblent aussi avoir moins bien utilisé leurs habiletés émettrices.

Enfin, les résultats montrent que certains savoir-faire sociaux progressent pour les sujets en jeu de rôle présentiel, sans que ce ne soit le cas pour ceux du groupe passé sur le prototype.

2.7.2. Résultats des managers, entre version visiocasque et version projetée

Quelques différences ont également été observées pour la population de managers. Cependant, aucune d'entre elles ne s'est montrée significative lors des tests.

Nous avons par exemple relevé que les évaluations des sujets du groupe utilisant le visiocasque semblaient s'améliorer pour les savoir-faire sociaux consistant à se montrer *Avenant et ouvert*, ainsi que pour le fait de savoir *Introduire le sujet*. Les évaluations du groupe ayant utilisé la version projetée ont en revanche semblé stables.

Nous avons aussi observé des différences sur certaines habiletés émettrices. La *Sérénité* et la *Posture* du groupe utilisant le visiocasque, semblent s'être améliorées lors du second passage. De plus, les évaluations de ces habiletés semblent inférieures lors du premier passage du groupe utilisant le visiocasque.

Les résultats des managers ne permettent donc pas d'établir de différences significatives selon l'interface visuelle utilisée. Seules des observations permettent de supposer que les sujets utilisant le visiocasque ont été moins efficaces au niveau de leurs habiletés émettrices, ainsi que lors de la phase introductive de la mise en situation.

2.7.3. Discussions sur l'évolution des évaluations

Les résultats des évaluations des commerciaux ne permettent pas d'identifier si l'utilisation de l'outil de formation en Réalité Virtuelle améliore le développement des compétences sociales. Les améliorations constatées peuvent principalement être analysées comme une régression par rapport à l'autre groupe. Il en est de même pour les résultats des Managers, qui ne permettent pas non plus d'identifier si l'interface visuelle utilisée améliore la démarche d'apprentissage.

En revanche, tous ces résultats permettent d'apporter des pistes d'amélioration pour rendre l'outil plus pertinent. Ils ont également permis formuler des hypothèses ou soulever des interrogations sur l'utilisation de la Réalité Virtuelle pour ce cas d'usage :

- Une mise en situation en Réalité Virtuelle permettrait de favoriser la gestion des émotions ?
Pour les résultats de l'item lié à la gestion du stress des commerciaux, nous avons observé de meilleures évaluations pour le groupe en Réalité Virtuelle.
Il est possible que les sujets se soient sentis moins stressés par la mise en situation en Réalité virtuelle. Des études supplémentaires sont nécessaire pour vérifier cette hypothèse. L'utilisation de mesures subjectives et objectives supplémentaires peut être une piste à explorer.
- L'utilisation de l'outil serait moins pertinente pour des utilisateurs expérimentés ?
Si l'hypothèse précédente concernant la gestion des émotions venait à être validée, il peut alors être intéressant d'utiliser l'outil pour des apprenants ayant peu d'expérience, peu confiance en eux et/ou ressentant une appréhension à effectuer la mise en situation.
Certains résultats des évaluations de savoir-faire sociaux des commerciaux viennent étayer cette perspective. Nous avons observé une évolution des évaluations pour la maîtrise de la situation du groupe passé sur le jeu de rôle présentiel, quand les évaluations du groupe en Réalité Virtuelle semblent rester proches. Nous avons relevé les mêmes effets pour l'attitude de leadership et la force de conviction. Ces savoir-faire sociaux impliquent un certain niveau d'expertise et donc d'expérience, ce qui permet de rejoindre la réflexion selon laquelle, en l'état actuel du prototype, un jeu de rôle présentiel serait plus pertinent pour des apprenants expérimentés.
Néanmoins, il est important de prendre en compte le fait que certaines limites peuvent avoir influé. Nous avons précédemment relevé que le prototype avait généré des échanges nettement moins dynamiques que les jeux de rôle présentiels. Lors des entretiens, 50% des sujets commerciaux et 33% des sujets managers du groupe projeté ont d'eux-même souligné qu'ils s'étaient "*sentis moins mis en difficulté*" en Réalité Virtuelle. Il est donc possible qu'à cause de ce manque de dynamisme, les sujets se soient sentis moins en difficulté et soient restés, de ce fait, plus calmes et posés.

- Une phase de familiarisation à l'interaction sociale est nécessaire.

Les évaluations de certains savoir-faire sociaux des commerciaux ont permis d'observer des évaluations plus basses lors du premier passage des sujets en Réalité Virtuelle, puis une amélioration lors du second passage sur le jeu de rôle présentiel.

Certains items étant évalués lors de la première phase d'*Introduction (Présentation et échanges, Climat de confiance, Avenant)*, il semblerait que les sujets aient manifesté une certaine retenue lors des premiers échanges.

Suite à l'état de l'art, nous avons identifié le besoin d'une phase de familiarisation afin d'amorcer la sensation de présence en Réalité Virtuelle. De la même manière, ces résultats nous laissent entrevoir la nécessité d'ajouter une phase de familiarisation à l'interaction sociale avec les personnages virtuels. En échangeant avec des personnages lors d'une phase d'initialisation, il serait peut-être possible de gommer ces différences. Après l'implémentation de la fonctionnalité, des études supplémentaires seraient donc nécessaires afin d'en confirmer l'intérêt.

Il faut noter que cet effet peut potentiellement être plus prononcé lors de l'utilisation d'un visiocasque. On observe les mêmes différences sur les items *Introduction du sujet* et *Initiation de la communication* des sujets managers ayant utilisé le visiocasque. Des expérimentations supplémentaires sont là encore nécessaires.

- L'évaluation d'habiletés émettrices soulève la problématique de la position du formateur en Réalité Virtuelle.

Pour les commerciaux, nous avons observé des évaluations plus faibles du groupe en Réalité Virtuelle. Ce fut notamment le cas pour l'utilisation du sourire et du regard.

Des échanges informels, menés à posteriori avec les formateurs, sont venus apporter des pistes d'interprétation. Les résultats semblent être liés au fait que, en Réalité Virtuelle, le formateur n'est plus positionné à la place de l'interlocuteur. Outre une distance supplémentaire, sa position dans l'espace et l'utilisation du visiocasque ne lui permettent pas d'observer correctement les habiletés émettrices et de les évaluer.

Ces résultats permettent donc de souligner l'importance du développement de métriques d'évaluation gérées par le système et permettant d'accompagner l'instructeur. En lui délivrant des indicateurs établis depuis la perception de l'interlocuteur, le système solutionnerait ce problème tout en permettant de réduire la part de subjectivité dans l'évaluation.

- Les apprenants seraient plus vigilants sur leur posture et leur sérénité affichée en utilisant un visiocasque ?

L'analyse des résultats des habiletés émettrices des managers ont permis d'observer des évaluations inférieures lors du premier passage, des sujets ayant utilisé la version visiocasque. Ce fut notamment le cas pour la *Posture* et la *Sérénité affichée*.

Des expérimentations supplémentaires sont nécessaires afin de vérifier si les apprenants n'ont pas tendance à être moins vigilants quant à leur posture et à leurs signes de nervosité, lorsqu'ils utilisent un visiocasque.

Si cette hypothèse venait à être confirmée, il faudrait alors analyser les causes de cet effet. Dans la version actuelle du prototype, il serait par exemple possible que le fait que les sujets ne voient pas leur corps, soit à l'origine de ce phénomène.

Au préalable, il faudrait cependant identifier quelles sont les postures correctes et incorrectes, tout comme les comportements pouvant être interprétés comme des signes de nervosité.

Outre la question de la taille des échantillons précédemment identifiée, une des limites de tous ces résultats provient des grilles et questionnaires utilisés. Établis de manière empirique avec les formateurs métier, ils concernent principalement des savoirs, des savoir-faire, ainsi que des savoir-être. Ils comportent donc une forte part de subjectivité. Avant d'effectuer des études supplémentaires, il est donc nécessaire d'améliorer ces éléments en identifiant, autant que possible, les différentes habiletés concernées par ces savoirs identifiés.

2.8. Autres marqueurs de pertinence pédagogique : conscience de soi et confiance en soi

Nous proposons d'analyser d'autres éléments pour évaluer la pertinence pédagogique : la conscience de soi et la confiance en soi. Les résultats n'ayant pas permis de relever de différences significatives ou d'apporter de nouveaux éléments, nous reprenons brièvement dans cette partie les résultats et les limites soulevés.

2.8.1. Conscience de soi

À partir des questionnaires de ressenti de la prestation remplis par les sujets et les évaluateurs, nous avons étudié la conscience de soi des sujets³³.

La majorité des observations viennent rejoindre celles émises lors de l'étude de l'évolution des évaluations :

- l'utilisation de la Réalité Virtuelle et du visiocasque aurait un impact sur la dimension émotionnelle de la mise en situation ;
- une phase de familiarisation à l'interaction sociale serait nécessaire ;
- l'utilisation de la Réalité Virtuelle et du visiocasque implique certaines problématiques pour l'observation des habiletés ;
- l'utilisation du visiocasque impacterait la vigilance posturale.

Les mêmes limites que celles identifiées lors de l'analyse de l'évolution des évaluations tendent à se poser.

Les questionnaires, conçus de manière empirique à partir de travaux avec les formateurs métiers, comportent une forte part de subjectivité. Bon nombre de savoirs, savoir-faire et savoir-être sont concernés par les items qui les composent.

De plus, les échelles de Likert sont graduées selon 4 niveaux seulement. Il est donc possible que ces mesures ne soient pas suffisamment fines.

Par conséquent, il serait nécessaire d'améliorer ces questionnaires. Proposer d'évaluer le ressenti de la prestation selon une échelle numérique (e.g. une note de 0 à 20) plutôt qu'une échelle de Likert peut potentiellement y contribuer. Enfin, comme pour les questionnaires et grilles d'évaluation, il serait nécessaire d'améliorer les questionnaires de ressenti de la prestation en identifiant plus précisément les habiletés concernées par les savoirs qui la composent.

2.8.2. Confiance en soi

Nous avons également étudié les résultats des questionnaires de confiance en soi³⁴.

Les résultats ont semblé indiquer une amélioration de la confiance en soi des sujets commerciaux passés en Réalité Virtuelle, alors que ce n'était pas le cas sur le jeu de rôle présentiel.

Des études supplémentaires sont nécessaires sur un échantillon plus large, afin de vérifier la véracité de cet effet. Si tel était le cas, l'utilisation de la Réalité Virtuelle peut être une solution intéressante à exploiter pour des apprenants manquant de confiance en eux, notamment pour des néo-apprenants.

Les résultats des managers ont semblé montrer le même effet lorsque l'interface visuelle utilisée est un visiocasque. En revanche, les résultats ont montré l'effet inverse pour la version projetée. Là encore, ces différences ne se sont pas révélées statistiquement significatives et de nouvelles expérimentations seraient nécessaires.

Une des principales limites des résultats concerne les questionnaires utilisés. Réalisés en collaboration avec les formateurs métier, ils s'inspirent de travaux du domaine des sciences humaines sans toutefois n'avoir été éprouvés au préalable. Des travaux supplémentaires sur ces questionnaires seraient donc nécessaires, afin de pouvoir garantir leur pertinence et leur fiabilité.

33. L'étude de la conscience de soi est disponible en Annexe 28

34. L'étude de la confiance en soi est disponible en Annexe 31

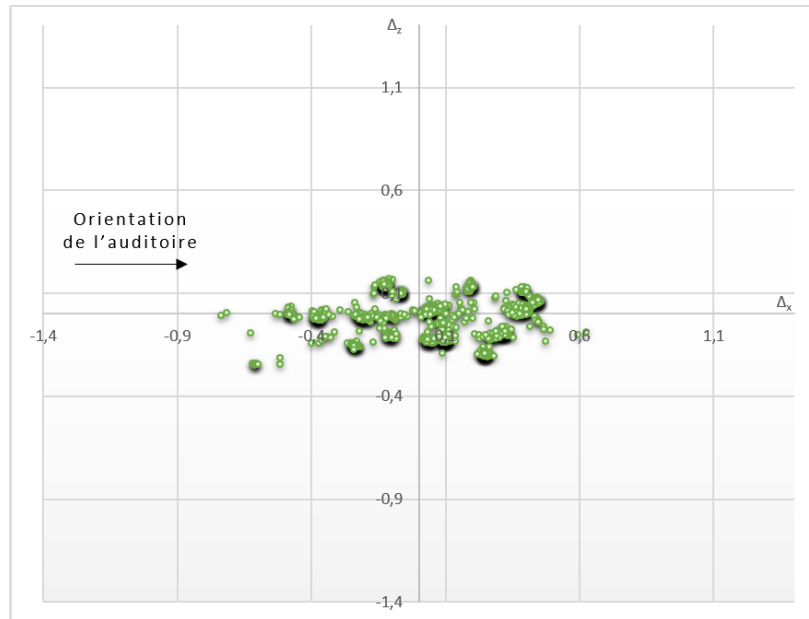


FIGURE 4.47: Exemple de nuage de points des positions centrées sur la moyenne, pour un sujet du groupe projeté

2.9. Utilisation de l'espace

Pour évaluer si l'utilisation d'un visiocasque était pertinente, nous avons souhaité analyser les déplacements dans l'espaces des sujets managers. Nous voulions établir si des différences de comportements étaient perceptibles sur cet aspect là, en fonction de l'interface visuelle utilisée.

2.9.1. Méthodologie pour l'étude de l'utilisation de l'espace

Le Vive Tracker fixé à la ceinture des managers a permis de suivre leur position toutes les 0.5 secondes, sur le plan (x,z) de la scène virtuelle.

Dû au positionnement du mur projeté, la localisation de l'auditoire différait entre les deux groupes. Afin que l'orientation de l'auditoire soit la même pour les deux groupes, nous avons harmonisé les position du groupe utilisant la version projetée, en appliquant une rotation à chaque position provenant de ses sujets.

Nous avons ensuite centré les positions des sujets autour de leur position moyenne (\bar{x}_i, \bar{y}_i) , afin d'en analyser les variations. Chaque point i centré est ainsi défini par de nouvelles coordonnées Δx_i et Δz_i :

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}_i$$

$$\Delta z_i = z_i - \bar{z}_i$$

Pour chaque sujet, on obtient donc un nuage de points correspondant à ces variations de déplacement (Figure 4.47).

Afin de traiter ces résultats, nous proposons d'examiner l'inertie du nuage de points des variations de déplacement, en effectuant une analyse en composantes principales. Elle consiste à calculer les vecteurs propres (v_1 et v_2) et les valeurs propres (λ_1 et λ_2) de la matrice de variance-covariance des deux variables caractérisant les variations de déplacement, i.e. les coordonnées Δx et Δz de chaque point du nuage de points.

Une matrice de variance-covariance est une matrice carrée comportant les variances et les covariances associées à plusieurs variables. Elle contient la variance des variables sur sa diagonale et leur covariance en dehors de la diagonale.

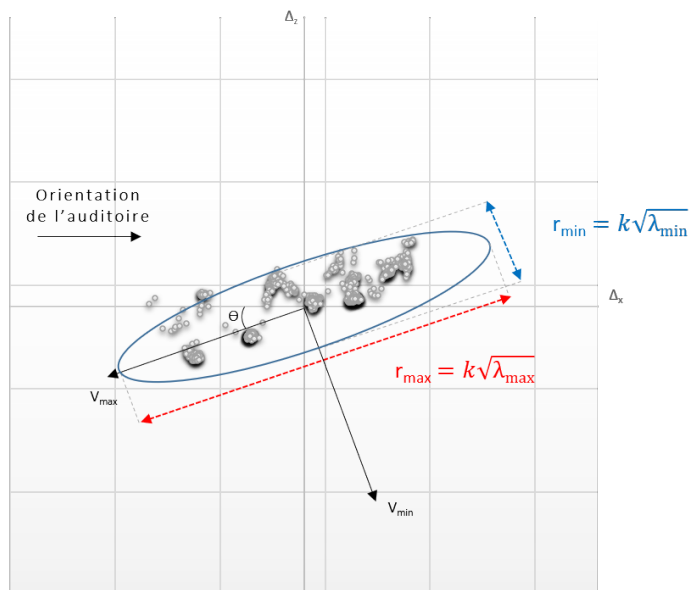


FIGURE 4.48: Exemple d'ellipse et de ses demi-axes

Pour chaque point i d'un nuage de n points, défini par ses coordonnées (x_i, y_i) , la matrice de variance-covariance (A) du nuage composé de N points est alors définie par la formule :

$$A = \frac{1}{N} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n (x_i^2) & \sum_{i=1}^n (x_i \times y_i) \\ \sum_{i=1}^n (x_i \times y_i) & \sum_{i=1}^n (y_i^2) \end{bmatrix}$$

À partir des valeurs propres λ_1 et λ_2 calculées, il est possible de définir une ellipse qui englobe un ensemble de points (Figure 4.48). De ces deux valeurs, il est nécessaire d'identifier les valeurs minimum (λ_{min}) et maximum (λ_{max}) afin d'identifier le demi-petit axe (r_{min}) et le demi-grand axe (r_{max}) de l'ellipse. Enfin, nous définissons v_{min} et v_{max} , comme les vecteurs propres correspondant respectivement aux valeurs propres λ_{min} et λ_{max} .

Si la distribution des points suit une loi normale, les demi-axes (Figure 4.48) peuvent être calculés à partir d'une constante k , telle que l'ellipse contient au moins :

- 68% des points, pour $k = 1$
- 95% des points, pour $k = 2$
- 99% des points, pour $k = 3$

Pour l'analyse de l'occupation de l'espace, nous proposons de définir cette valeur k à 3.

Nous avons voulu regarder si des différences de comportement étaient perceptibles dans l'occupation de l'espace, en fonction de l'interface visuelle utilisée. Nous avons étudié ces comportements en analysant ces ellipses selon les marqueurs suivants :

- Comparer la surface des ellipses entre les deux groupes de sujets.
Afin d'établir si un des deux groupes tendait à couvrir une surface plus importante de l'espace, nous avons calculé la surface des ellipses (S), à partir de la formule de calcul de la surface d'une ellipse :

$$S = \pi \times \lambda_{min} \times \lambda_{max}$$

- Comparer le rapport entre le demi-petit axe (r_{min}) et le demi-grand axe (r_{max}) des ellipses, pour les sujets de chaque groupe.
Nous avons souhaité observer si l'occupation de l'espace s'effectuait de manière équilibrée en dessinant une ellipse proche d'un cercle ($r_{min} \simeq r_{max}$), ou bien de manière irrégulière en dessinant une ellipse ovale ($r_{min} < r_{max}$) (Figure 4.49). Pour ce faire, nous avons défini un indice

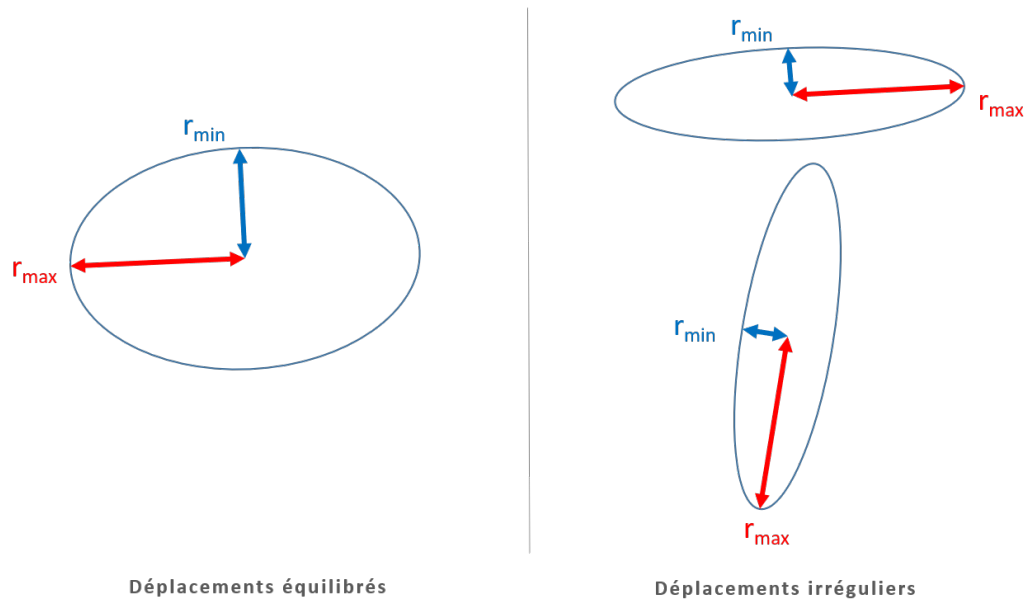


FIGURE 4.49: Exemple d'ellipses correspondant à des déplacements équilibrés (gauche) et irréguliers (droite)

d'équilibre (ϵ), calculé en effectuant le rapport entre le demi-petit axe et le demi-grand axe de l'ellipse :

$$\epsilon = \frac{r_{min}}{r_{max}}$$

Cet indice est donc compris entre 0 et 1, les déplacements étant ainsi plus équilibrés lorsque son indice se rapproche de 1. À l'inverse, ils sont plus irréguliers lorsque ceux-ci se rapproche de 0.

- Comparer les principales directions de déplacement.

Enfin, nous avons voulu regarder si les sujets de chaque groupe suivaient des directions principales de déplacement différentes. Pour ce faire, nous avons donc voulu observer la direction de v_{max} . Nous avons donc souhaité définir un indice de direction δ (Figure 4.50) pour lequel les valeurs correspondent à :

- −1 : lorsque le déplacement est frontal ;
- 0 : lorsque le déplacement est diagonal ;
- 1 : lorsque le déplacement est latéral.

Cet indice de direction s'exprime donc par la formule :

$$\delta = (2 \times |\cos(\theta)|) - 1$$

2.9.2. Résultats de l'occupation de l'espace pour les managers : visiocasque et projeté

Les variations de déplacement, centrés sur la position moyenne, sont présentés en Figure 4.51. Les nuages de points et leurs ellipse d'inertie sont quant à eux visibles en Figure 4.52.

Nous avons comparé les ellipses entre les deux groupes de sujets (Figure 4.53).

On observe une distribution plus large des surfaces (S) pour les sujets du groupe projeté. Leurs ellipses semblent également plus équilibrées (ϵ). Enfin, l'indice de direction (δ) montre une médiane plus diagonale ($\simeq 0$)

Même si ces différences peuvent être observées, elles ne se sont pas montrées statistiquement significatives (Table 4.4).

On observe donc seulement que les sujets avec le visiocasque semblent avoir couvert moins de surface, de manière moins équilibrée et plus latérale.

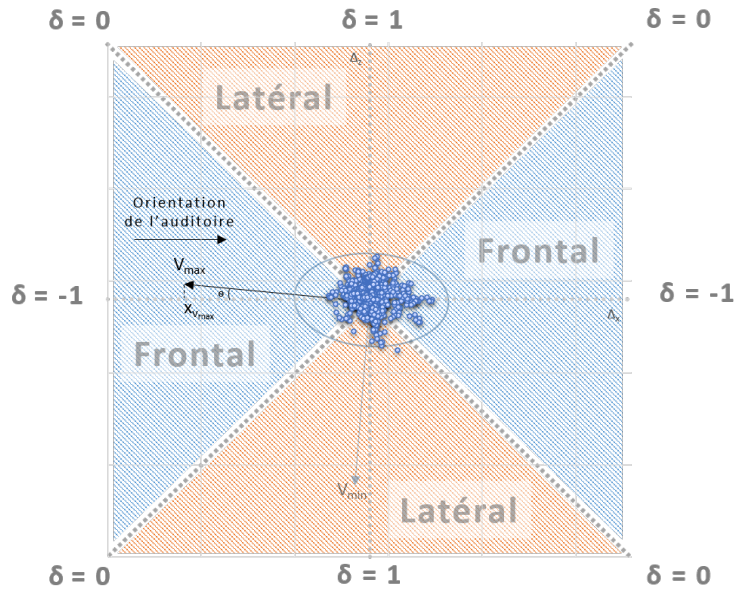


FIGURE 4.50: Indice de direction δ , en fonction d'un déplacement frontal ou latéral

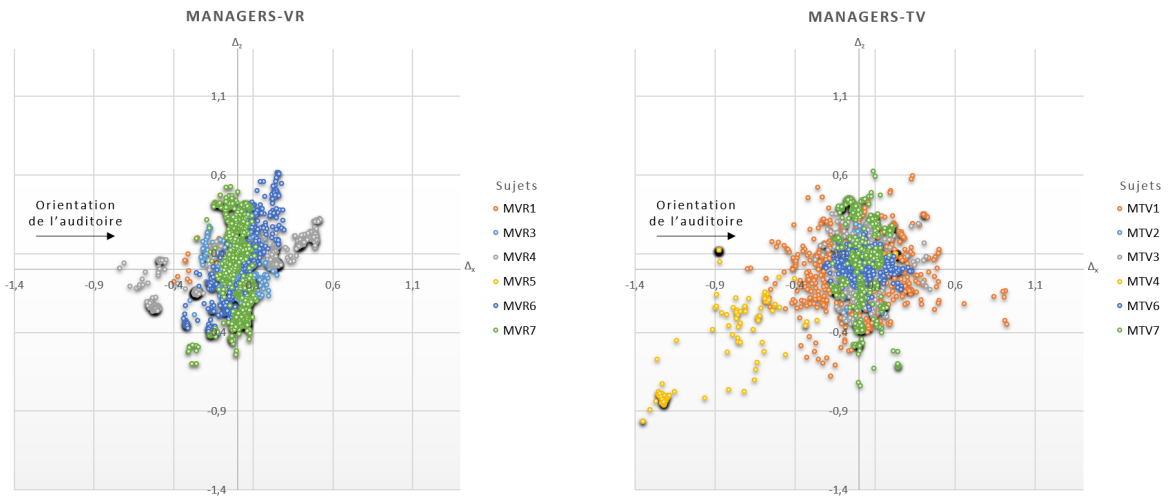


FIGURE 4.51: Variations des déplacements des managers dans l'espace (/0.5s)

TABLE 4.4: Résultats des ellipses d'inertie des variation d'occupation de l'espace par les managers, et résultats des tests statistiques (test de Student)

	Groupe	Moyenne (\bar{x})	Résultat du test	Différence
Surface (S)	VR	0.3971 (± 0.1891)	$p > 0.05$	Non significative
	TV	0.6858 (± 0.6356)		
Équilibre (ϵ)	VR	0.3519 (± 0.2756)	Test de normalité échoué ($p < 0.05$), Wilcoxon-Mann-Whitney : $p > 0.05$	Non significative
	TV	0.5616 (± 0.2617)		
Direction (δ)	VR	0.1277 (± 0.8757)	$p > 0.05$	Non significative
	TV	-0.0050 (± 0.9780)		

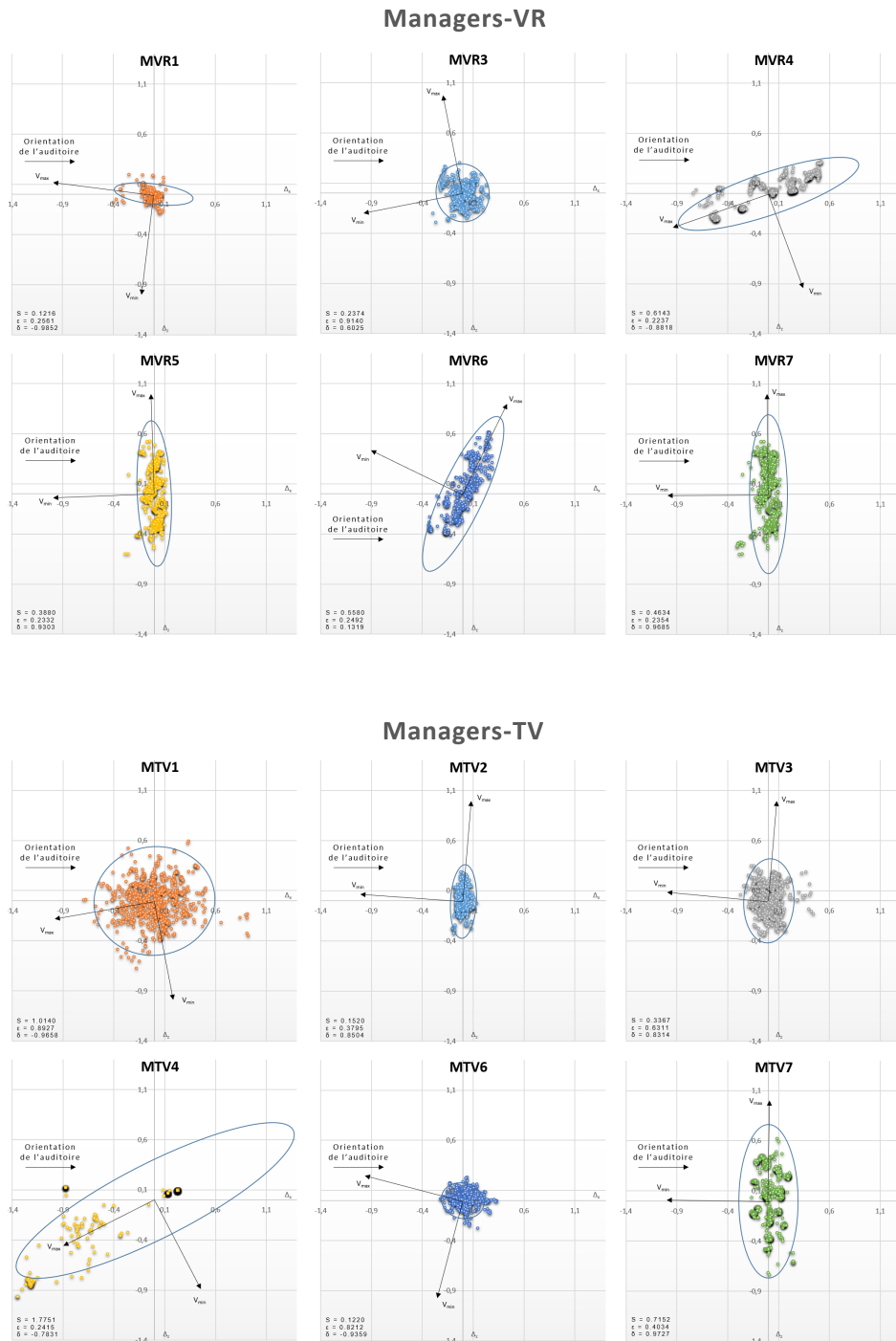


FIGURE 4.52: Variations de déplacement et ellipses d'inertie des points pour chaque sujet

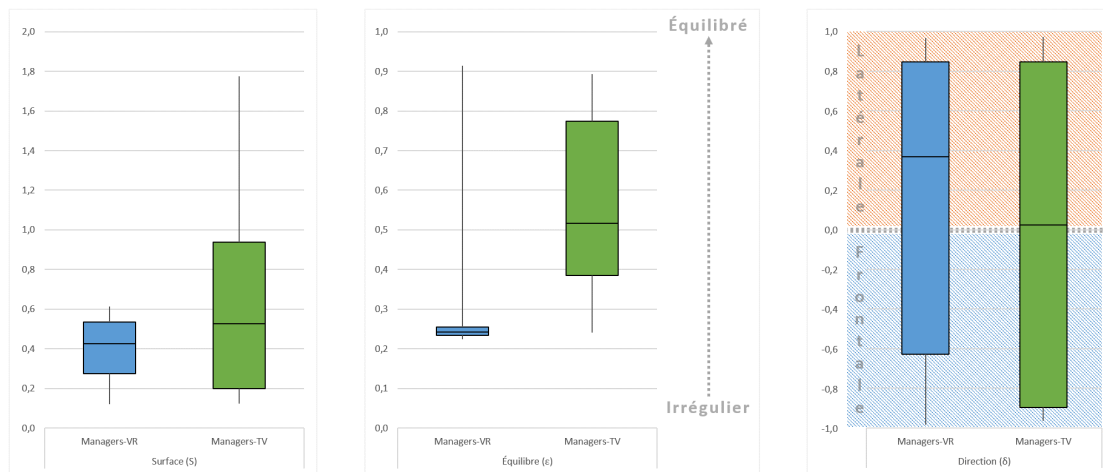


FIGURE 4.53: Résultats des ellipses d'inertie des variations de déplacement pour chaque groupe de sujets

2.9.3. Discussions sur l'occupation de l'espace

N'ayant pas trouvé de méthodes pour analyser l'occupation de l'espace lors de mises en situation de formation aux compétences sociales en Réalité Virtuelle, nous en avons proposé une.

Nous l'avons appliqué lors des expérimentations sur les managers, afin d'observer si l'interface visuelle influait sur l'occupation de l'espace.

Nous avons suggéré d'analyser une ellipse englobant le nuage de points dessiné par des variations de déplacement, selon trois métriques distinctes : sa surface (S), son équilibre (indice ϵ) et sa direction principale (indice δ).

Les comparaisons de ces trois indicateurs n'ont pas montré de différences statistiquement significatives selon l'interface visuelle utilisée. La faible taille des deux groupes (6 sujets) est une des pistes d'explication les plus probables.

Cependant, certaines différences peuvent être observées. Elles permettent de formuler les hypothèses suivantes :

- Les utilisateurs de la version projetée tendraient à couvrir plus d'espace, que ceux utilisant le visiocasque.
Les surfaces (S) des ellipses semblent présenter une distribution des données plus importante pour les sujets du groupe projeté.
- Les utilisateurs de la version projetée effectueraient des déplacements plus équilibrés dans l'espace, que ceux utilisant le visiocasque.
Les indices d'équilibre (ϵ) semblent être plus équilibrés pour les sujets du groupe projeté. Ceux du groupe visiocasque semblent plus irréguliers, se déplaçant plus fortement selon un axe principal.
- Les utilisateurs de la version projetée effectueraient des déplacements plus diagonaux, quand ceux utilisant le visiocasque accompliraient des déplacements plus latéraux.
Les indices de direction (δ) montrent une moyenne quasi nulle pour le groupe projeté, alors que celle du groupe visiocasque avoisine 0.5 (voir Table 4.4, p.152).

Pour vérifier ces hypothèses, des études supplémentaires sur un échantillon plus large sont nécessaires. Si elles venaient à être confirmées, l'utilisation d'une version projetée de l'outil devrait être fortement considérée lorsque l'occupation de l'espace constitue une habileté émettrice importante à développer et à évaluer.

Plusieurs pistes d'explication s'ouvriraient alors pour expliquer ce phénomène.

Il est par exemple possible que l'utilisation du visiocasque et/ou un manque de familiarité avec celui-ci amène les sujets à avoir quelques retenues ou quelques réticences, à se déplacer dans l'espace. Comme nous l'avons vu, certains sujets se sont plaints de la gêne liée au visiocasque lors des entretiens.

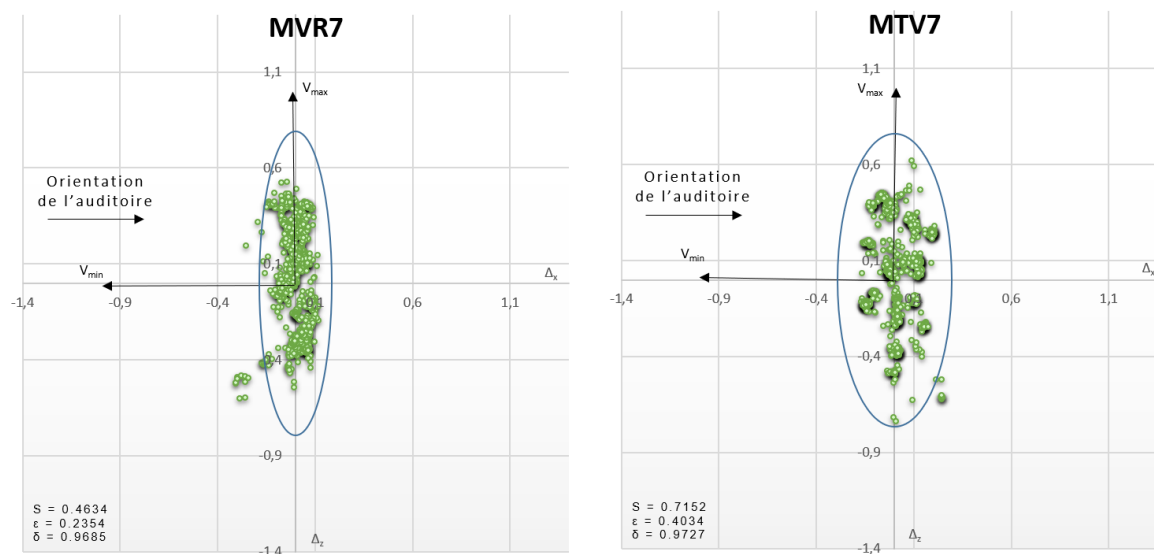


FIGURE 4.54: Exemples d'ellipses aux points répartis de manière différente : diffuse (gauche) et groupées (droite)

Il est possible qu'il ait également suscité des retenues pour occuper l'espace.

Une autre piste peut provenir d'effets sur la de perception des distances en Réalité Virtuelle lorsqu'on utilise un visiocasque. Certains auteurs ont par exemple mesuré des différences lorsqu'un objet virtuel est disposé sur les côtés [174].

Nos travaux soulèvent également la question importante de la définition de ce qui constitue une bonne occupation de l'espace.

Pour une situation donnée, la définition d'une occupation optimale n'est en effet pas définie et semble amplement subjective.

À partir des trois indicateurs que nous avons défini (S , ϵ et δ), il serait intéressant de chercher à établir la possibilité de déterminer une bonne occupation de l'espace. Plusieurs pistes pourraient être intéressantes à exploiter :

- Analyser le domaine pédagogique du métier concerné par l'outil de formation.
Des caractérisations d'une occupation de l'espace adéquate peuvent exister dans la littérature pédagogique du domaine cible. Elles permettraient de définir cette métrique.
- Comparer des évaluations subjectives, à partir d'indicateurs de mesure.
Une des autres possibilités peut consister à faire évaluer l'occupation de l'espace par plusieurs observateurs (en présence ou à partir de corpus vidéo). Il serait ensuite possible d'analyser si des corrélations existent entre les ellipses dessinées par les sujets et les évaluations récoltées.
- Capitaliser sur les comportements de sujets expérimentés.
Pour rejoindre la problématique de capitalisation sur l'expérience, il peut être intéressant de mesurer l'occupation de l'espace de sujets expérimentés. Cela permettrait d'observer si, en fonction des profils, les ellipses comportent des caractéristiques communes pouvant permettre d'en définir un modèle optimale.

Enfin, d'autres caractéristiques de l'ellipse pourraient s'avérer intéressantes à analyser. La manière dont les points sont répartis peut constituer un indicateur supplémentaire à analyser entre deux ellipses similaires. Par exemple, la Figure 4.54 montre deux ellipses pour lesquelles, même si les surfaces diffèrent, les équilibres (ϵ) et les directions (δ) sont similaires. Or, la façon dont les points sont répartis semble très différente. Ceux à gauche étant répartis de manière diffuse, quand ceux à droite le sont par petits groupes. Cette caractéristique peut donc constituer un indicateur supplémentaire à définir.

2.10. Autres éléments soulevés lors des entretiens oraux

Pour finir, les entretiens ont permis de soulever des points supplémentaires.

Les managers ont fréquemment exprimé avoir été gênés de ne pas connaître leurs interlocuteurs (50% de chaque groupe).

Ces retours ont permis de noter que la connaissance des membres de l'équipe est une donnée importante prise en compte par les managers lors des situations de communication d'équipe. Ils vont ainsi chercher à utiliser l'historique, les affinités et les spécificités des profils, pour user de stratégies et amener la situation de communication dans la direction désirée (e.g. apaisement de la situation, illustration en citant des membres de l'équipe en exemple, etc.).

Pour y répondre, il faudrait inclure la fonctionnalité d'un briefing pré-expérience, au cours duquel les différents profils de l'équipe seraient présentés. Dans le cas d'une intégration régulière de l'outil au sein d'un parcours de formation, il serait aussi intéressant d'utiliser des personnages récurrents disposant de profils et de comportements qui leurs sont propres.

La moitié des managers ayant utilisé le visiocasque ont souligné d'eux-mêmes que l'outil augmentait la sensation de masse provenant de l'auditoire, qui s'avère compliquée à mettre en place lors de jeux de rôle présentiels.

Ceux ayant utilisé la version projetée ne se sont cependant pas exprimés à ce sujet. Il serait intéressant d'analyser s'il s'agit d'un effet plus important lorsque les apprenants utilisent un visiocasque, auquel cas l'utilisation de cette interface visuelle serait à prendre en compte lors de mises en situation face à un auditoire conséquent.

Certains sujets managers ont aussi exprimé qu'ils trouveraient intéressant de pouvoir revoir leur prestation (38% du groupe visiocasque).

Nous avons songé à cette fonctionnalité avec les formateurs, lors de la définition du périmètre fonctionnel de l'outil. Un autre apport de la Réalité Virtuelle peut consister à permettre à l'utilisateur de revivre sa prestation, que ce soit depuis son propre point de vue, celui d'un de ses interlocuteurs, ou à partir de tout autre point de vue sélectionné par le formateur.

Une telle fonctionnalité peut aussi permettre d'apporter des solutions à certaines régressions potentielles liées à l'usage de la Réalité Virtuelle, si celles-ci venaient à être confirmées par des expérimentations supplémentaires (e.g. conscience de la posture, du regard, de la voix, etc.).

Enfin, il est intéressant de noter que de nombreux sujets (50% des sujets commerciaux du groupe de traitement et 50% des sujets managers du groupe visiocasque) ont d'eux-même souligné la problématique de complicité, présente avec les acteurs lors de leur passage en jeu de rôle présentiel et absente en Réalité Virtuelle. Ces retours viennent renforcer notre vision de la Réalité Virtuelle, comme une solution permettant de répondre potentiellement à cette problématique.

2.11. Discussions générales

2.11.1. Limites générales des résultats

Les principales limites de nos résultats concernent les populations sur lesquelles les expérimentations ont été effectuées.

Nous avons souhaité expérimenter le prototype sur des utilisateurs finaux et en rassembler un nombre conséquent n'est pas chose aisée. La taille de nos populations est ainsi une des principales limites des expérimentations. Elles ne permettent pas d'établir bon nombre des différences observées comme statistiquement significatives. Lors de travaux futurs, il serait donc nécessaire de viser un échantillon plus important.

Une autre caractéristique des populations testées concerne le niveau d'expérience des sujets. La quasi-totalité d'entre eux présentaient en effet plusieurs années d'expérience. Si cela nous a permis d'effectuer nos expériences dans un cadre de maintien de compétences, nous n'avons en revanche pas pu les réaliser dans un contexte de développement de compétences. Il serait donc intéressant de cibler des apprenants néophytes lors d'expérimentations futures.

Enfin, il faut aussi préciser que les formateurs sollicités lors des expérimentations faisaient partie intégrante du projet, depuis son commencement.

Il est possible que cette implication puisse avoir apporté des biais expérimentaux. Ceux-ci peuvent avoir été inconsciemment influencés par leur implication dans le projet, que ce soit dans leur manière d'évaluer les sujets, ou même dans leur comportement lors de l'utilisation de l'interface magicien d'Oz. Pour limiter ces biais potentiels, il serait judicieux d'utiliser des formateurs extérieurs au projet lors de travaux futurs. Cela peut être l'occasion d'analyser l'expérience utilisateur des formateurs afin d'améliorer le prototype, ces derniers étant également des utilisateurs finaux du système.

2.11.2. Pertinence de l'outil en fonction de l'expertise de l'apprenant

Un des principaux enseignements que nous tirons de ces expérimentations concerne la pertinence de l'outil en fonction de l'expérience de l'apprenant.

Certains résultats tels que ceux liés à l'utilisabilité, la sensation de présence sociale, l'équilibre des temps de parole, ou encore l'évolution des évaluations, ont montré les limites actuelles du prototype en terme d'interactivité. Ils ont également montré que ces limites, ne permettent pas de mettre en difficulté les apprenants et tendent à réduire la pertinence de l'outil chez les utilisateurs expérimentés.

En revanche, d'autres résultats sur l'évolution des évaluations, la conscience de soi et la confiance en soi, suggèrent que l'outil en Réalité Virtuelle apporte potentiellement une dimension émotionnelle et une mise en confiance plus importantes que les jeux de rôles traditionnels.

Les entretiens oraux tendent à appuyer ces observations. 38% des sujets commerciaux passés en Réalité Virtuelle ont par exemple d'eux-même souligné l'intérêt de l'outil pour de l'entraînement et de la prise de confiance en soi.

Tous ces éléments nous laissent supposer, qu'en l'état, un outil basé sur le prototype peut trouver sa pertinence dans l'accélération de la montée en compétences d'apprenants inexpérimentés.

Le challenge d'atteindre des mises en situation virtuelles aussi dynamiques que les jeux de rôles traditionnels s'avère extrêmement complexe, ne permettant pas d'atteindre une mise en difficulté suffisante pour cibler des utilisateurs expérimentés. Nous voyons donc une utilisation pertinente de l'outil en amont des jeux de rôles traditionnels, permettant à l'utilisateur néophyte d'acquérir de l'expérience plus rapidement en la vivant au travers de mises en situation virtuelles.

2.12. Conclusions des expérimentations

Nous avons conduit ces expérimentations afin d'évaluer la pertinence de l'Holodeck Safran.

L'outil a obtenu de bons résultats d'utilisabilité sur les utilisateurs finaux, tant pour les prototypes managers que pour celui à destination des commerciaux.

L'étude de la sensation de présence est venue confirmer les résultats relevés sur le prototype lors de l'étude préliminaire. Ils semblent même s'améliorer dans un contexte plus cohérent entre la scène virtuelle et le scénario joué par les personnages virtuels.

L'étude des cybermalaises a en revanche montré des résultats nuancés pour l'étude des cybermalaises. Si les résultats des managers ne montrent pas d'anormalité de symptômes ressentis, ceux des commerciaux indiquent le contraire. Nous avons identifié que cette anormalité pouvait provenir des troubles de la vision présents chez certains sujets, mais des études supplémentaires sont nécessaires.

Nous n'avons pas non plus réussi à mesurer avec certitude des apports d'apprentissage pour l'évolution des évaluations, de la conscience de soi et de confiance en soi.

Si un apport en terme de confiance en soi a été observé, nous n'avons cependant pas pu garantir qu'il ne soit pas lié à un effet de hasard. Les autres résultats nous ont plutôt indiqué les limites actuelles du prototype et permis d'identifier des pistes d'amélioration.

Cependant, nos observations ont permis d'identifier une pertinence potentielle de l'outil, pour la formation aux compétences sociales d'apprenants peu expérimentés.

Les comparaisons effectuées entre le prototype en Réalité Virtuelle et les jeux de rôle traditionnels ont également souligné des résultats polarisés.

Les apprenants se sont sentis moins présents socialement et l'analyse de l'équilibre des temps de parole est venue confirmer le manque de dynamisme des échanges rapporté par les sujets.

Nous n'avons pas non plus identifié avec certitude des apports d'apprentissage.

Comme nous venons de le mentionner, seule la confiance en soi a semblé progresser plus positivement en Réalité Virtuelle, sans toutefois être significative.

L'utilisation du visiocasque n'a pas non plus permis de relever des apports significatifs pour l'apprentissage.

En revanche, les sujets ayant utilisé le visiocasque semblent s'être sentis plus présents. Il est donc possible que des études supplémentaires, sur des échantillons plus larges et plus représentatifs, permettent de relever des apports pour l'utilisation d'un visiocasque.

Cependant, même si nous n'avons pas pu garantir que ces effets soient dûs au hasard, nous avons observé que les sujets semblaient être plus vigilant à leur posture et à leur sérénité affichée en utilisant la version projetée. Ils ont aussi semblé occuper l'espace de manière différente, mais des travaux de caractérisation d'une bonne occupation seraient nécessaires. Il est donc probable que l'utilisation (ou non) du visiocasque soit à privilégier, selon les caractéristiques du sujet de la formation et de la mise en situation.

Enfin, les résultats sur les cybermalaises ont montré une anormalité pour les deux populations. Nous avons vu qu'elle semblait être liée aux troubles de la vision des sujets. Si des études supplémentaires venaient à le confirmer, l'utilisation d'une version projetée serait à privilégier selon les profils des apprenants.

Nous recommandons donc de toujours disposer d'une version "écran", afin d'assurer la pertinence d'un outil de formation aux compétences sociales en Réalité Virtuelle.

Les expérimentations ont aussi permis de relever de nombreuses améliorations à apporter au prototype d'outil de formation en Réalité Virtuelle.

Parmi celles-ci, nous retenons :

- L'amélioration du panneau de contrôle magicien d'Oz.
- L'utilisation d'un visiocasque sans-fil, ou d'un système de guidage du câble.
- L'amélioration des personnages virtuels.
- L'ajout d'une phase de familiarisation à l'interaction sociale.
- L'implémentation de métriques et de feedback à disposition du formateur.
- L'intégration d'un briefing avant la mise en situation, ainsi que des personnages virtuels récurrents.
- L'implémentation d'un outil permettant de revoir la mise en situation en Réalité Virtuelle.

Nos travaux ont également permis d'émettre plusieurs hypothèses concernant l'utilisation de la Réalité Virtuelle et du visiocasque pour la formation aux compétences sociales :

- L'interface visuelle utilisée influencerait sur la perception d'expressions faciales ?
- Les troubles de la vision auraient une incidence sur les cybermalaises ?
- L'utilisation du visiocasque et/ou l'environnement virtuel auraient un effet sur les symptômes de désorientation ?
- Une mise en situation en Réalité Virtuelle permettrait de favoriser la gestion des émotions ?
- Les apprenants seraient plus vigilants quant à certaines de leurs habiletés émettrices (posture, sérénité affichée, occupation de l'espace) lorsqu'ils utilisent une interface visuelle projetée ?
- La Réalité Virtuelle et le visiocasque permettraient d'améliorer la confiance en soi ?
- Le visiocasque induirait une sensation de masse accrue face à un auditoire fourni ?

Les travaux futurs devraient donc s'occuper à effectuer les améliorations révélées lors des expérimentations, avant de chercher à vérifier les hypothèses qu'elles ont soulevé.

3. Conclusions des travaux sur l'holodeck Safran

Les travaux traités dans cette section nous ont permis de proposer un prototype d'outil de formation aux compétences sociales, visant à répondre aux problématiques soulevées par les jeux de rôles traditionnels

Nous avons dans un premier temps effectué une étude préliminaire pour analyser la pertinence du prototype, puis nous avons souhaité conduire des expérimentations, en mettant à contribution des utilisateurs finaux sur des scénarios à destination de managers et commerciaux.

Afin de palier certaines absences dans la littérature, nous avons dû proposer différentes contributions destinées à évaluer la pertinence du prototype :

- Une méthode statistique pour interpréter les résultats des questionnaires de cybermalaises (SSQ). La plupart des travaux de la littérature se contentent de calculer et d'interpréter les scores SSQ. Nous avons proposé d'utiliser des tests de Kolmogorov-Smirnov pour comparer nos résultats à ceux de l'échantillon de référence fourni par les auteurs, et détecter ainsi d'éventuelles anomalies dans leur distribution.
- Des grilles et questionnaires visant à évaluer les apprenants. Conçus de manière empirique avec les formateurs métiers, ils ont permis d'évaluer les commerciaux sur la négociation client et les managers sur la communication d'équipe.
- Une méthode statistique pour gérer le cas de données qualitatives provenant de deux évaluateurs. Avant de pouvoir analyser les résultats de données qualitatives obtenues par deux évaluateurs, nous avons proposé de déterminer si l'interprétation des échelles de mesure des deux évaluateurs était la même, afin de savoir s'il était nécessaire de traiter leurs résultats conjointement ou indépendamment.
- Des questionnaires pour évaluer la confiance en soi. Élaborés de manière empirique avec les formateurs en se basant sur des travaux de la littérature, ils nous ont permis de chercher à analyser si la confiance en soi des sujets évoluait différemment en Réalité Virtuelle.
- Une méthode pour capturer et analyser l'occupation de l'espace par l'apprenant. Nous avons proposé une solution technique et une méthode pour enregistrer puis caractériser les déplacements de l'apprenant en Réalité Virtuelle. Elle permet d'ouvrir des perspectives dans l'optique de développement d'une métrique d'évaluation du sujet sur cet aspect.

Nous avons aussi l'espace d'Interaction-Perception, afin de positionner les travaux par rapport aux travaux de la littérature. Il permet de situer nos travaux sur l'Holodeck Safran (Figure 4.55).

Les expérimentations ont permis d'identifier de nombreuses améliorations importantes à apporter au prototype. Celles-ci devraient permettre d'en faire évoluer le positionnement sur cet espace.

Ces améliorations devraient ainsi être la priorité des travaux menés dans la continuité de ces expérimentations.

Enfin, les expérimentations ont permis d'émettre plusieurs hypothèses sur l'utilisation de la Réalité Virtuelle pour la formation aux compétences sociales. La majorité d'entre-elles conditionne des choix de conception et d'utilisation de l'outil.

Une fois les travaux d'amélioration menés, des études supplémentaires seraient donc nécessaires afin de les vérifier.

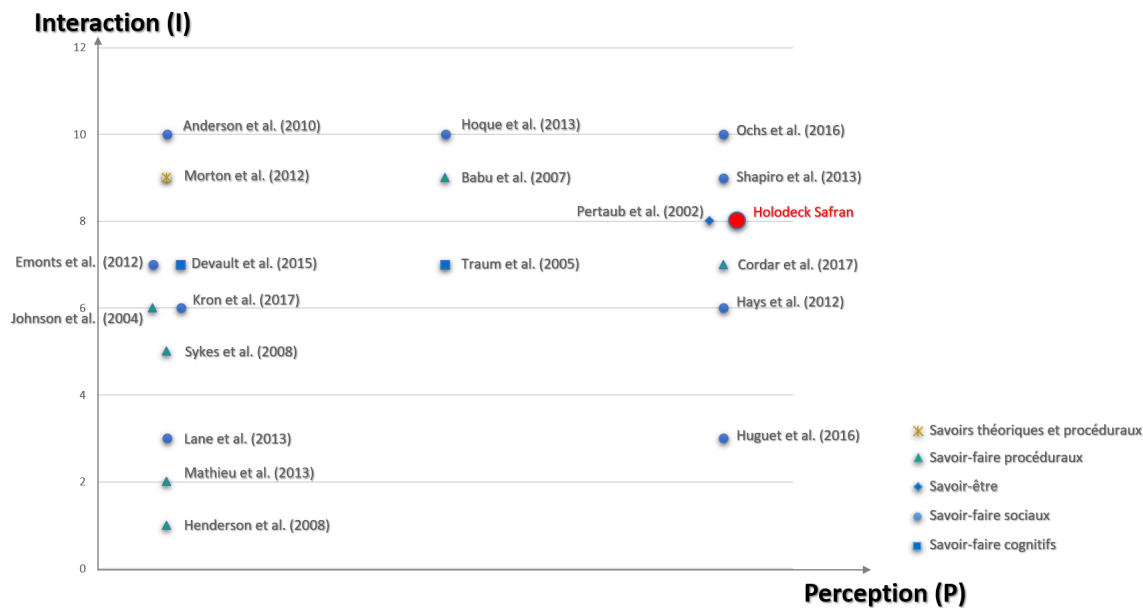


FIGURE 4.55: Positionnement de l'Holodeck Safran par rapport aux travaux de la littérature, selon l'espace d'évaluation Interaction-Perception

V Conclusions sur la formation aux compétences sociales

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'utilisation de la Réalité Virtuelle pour la formation aux compétences sociales. Nous avons proposé une définition des compétences et des habiletés sociales, en essayant de nous approprier les différentes sensibilités inter-domaines. Nous avons également tracé une ébauche de représentation des compétences sociales en se basant sur celle que nous avons proposé de la compétence.

En ciblant deux cas d'usages, un pour les métiers managériaux et un autre pour les métiers commerciaux, nous avons identifié des problématiques communes présentes dans les formations traditionnelles.

Nous avons ensuite dressé un état de l'art sur la formation aux compétences sociales via les technologies immersives, afin de voir si la littérature proposait des solutions à ces problématiques.

À cette occasion, nous avons proposé l'espace Interaction-Perception, une manière d'évaluer et de situer les travaux en fonction de leurs degrés d'interaction et de perception.

En partant du constat que la majorité des travaux tendent à capitaliser sur les possibilités offertes par la Réalité Virtuelle pour effectuer des mises en situation d'apprentissage, nous avons proposé un outil de formation aux compétences sociales en Réalité Virtuelle. Il vise à répondre aux problématiques de formation identifiées.

Nous avons réalisé un prototype dont nous avons évalué la pertinence via des expériences sur des utilisateurs finaux.

Celles-ci ont permis de relever de nombreuses améliorations à apporter, tant sur le plan technique que fonctionnel. Ces améliorations devraient constituer les tâches prioritaires des démarches s'inscrivant dans la continuité de nos travaux.

Les expérimentations ont également amené de nombreuses hypothèses concernant l'utilisation de la Réalité Virtuelle pour la formation aux compétences sociales. Ces hypothèses pourraient potentiellement influencer les démarches de conception et d'utilisation d'un outil de formation. Elles nous semblent donc importantes à explorer, afin de pouvoir garantir la pertinence de tout outil de formation aux compétences sociales en Réalité Virtuelle.

Nos expérimentations ont également permis de proposer plusieurs contributions au domaine. Nous avons en effet élaboré plusieurs questionnaires et méthodes statistiques afin de mesurer la pertinence de l'outil.

Enfin, les expérimentations sur des utilisateurs finaux ont permis de confirmer, de répondre ou d'entrevoir des perspectives pour les problématiques identifiées.

Les problèmes de complicité entre les acteurs et les apprenants ont notamment été confirmés lors des entretiens oraux.

L'outil proposé tend à répondre au manque de réalisme et de contextualisation des mises en situation présentes traditionnellement utilisées.

Les résultats sur la sensation de présence permettent d'envisager cette perspective. Cependant, ceux sur la sensation de présence sociale indiquent une régression. De nombreuses améliorations sont donc nécessaires afin de se rapprocher le plus possible des mêmes niveaux d'interactivité proposés par des interlocuteurs humains.

Les expérimentations ont aussi permis de poser les bases méthodologiques de l'élaboration de métriques d'évaluation au sein de l'outil. Elles ont souligné la nécessité de développer ces métriques pour pallier au changement de paradigme du formateur, qui devient observateur extérieur en Réalité Virtuelle. Cela apporte des perspectives intéressantes en vue de répondre dans le même temps aux problématiques de subjectivité d'évaluation.

Pour finir, la problématique de capitalisation sur l'expérience peut trouver des réponses via l'implémentation de telles métriques. Faire passer des utilisateurs experts sur un outil en Réalité Virtuelle, puis analyser leurs comportements, peut potentiellement permettre d'identifier et de mesurer des comportements à développer pour des apprenants moins expérimentés.

Pertinence d'expressions faciales émotionnelles en Réalité Virtuelle

Lors des travaux sur l'Holodeck Safran, nous avons utilisé des personnages virtuels afin de simuler le comportement d'interlocuteurs placés face à l'apprenant.

Une des fonctionnalités du système permet au formateur de définir en temps réel les états émotionnels de ces personnages. Le système va ainsi modifier son expression faciale pour qu'elle corresponde à l'état émotionnel et à son intensité.

Cette fonctionnalité occupe une place importante dans l'outil d'apprentissage, car il contribue à apporter une dimension émotionnelle à la mise en situation. Pour d'atteindre un outil de formation aux compétences sociales pertinent, il apparaît donc nécessaire de définir et dessiner les expressions faciales émotionnelles de manière représentative.

Dans ce chapitre, nous allons chercher à identifier dans un premier temps les problématiques soulevées par l'utilisation des expressions faciales émotionnelles.

Puis, dans une volonté de garantir la pertinence de l'outil d'apprentissage, nous essayons d'établir comment y répondre.

Nous nous intéressons également aux manières de dessiner des expressions faciales émotionnelles.

Nous essayons ensuite de définir une manière pertinente de dessiner ces expressions.

Nous explorons notamment les possibilités de la Réalité Virtuelle, afin de dessiner des expressions faciales émotionnelles à partir d'une population de sujets. Pour ce faire, nous proposons des méthodologies nous permettant de qualifier ces expressions et d'en établir la pertinence.

I Problématiques liées aux expressions faciales émotionnelles

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, les agents conversationnels incarnés constituent des interfaces très utiles pour la formation aux compétences sociales.

Les expressions faciales sont un des moyens de communication principaux utilisés par ces personnages virtuels [57]. En effet, le visage est un des composants les plus importants des communications sociales [175]. L'association des expressions faciales aux autres messages verbaux et non verbaux est cruciale pour obtenir des échanges sociaux accomplis [176].

Courgeon et al. [177] rapportent que Ekman et Friesen [178] ont proposé la définition suivante pour les expressions faciales :

Expression faciale :

Signaux rapides produits par des mouvements des muscles faciaux, causant des changements temporaires de l'apparence du visage, des modifications de l'emplacement et de la forme des traits faciaux, ainsi que des rides temporaires.

Les expressions faciales peuvent transmettre une multitude d'informations.

Elles sont considérées comme le moyen le plus visible de communiquer involontairement une émotion [179, 180, 181].

Leur reconnaissance est d'ailleurs une compétence fondamentale des interactions sociales [182, 183, 184]. Elle peut en effet amener une régulation des comportements sociaux via des réactions instinctives visant à éviter des situations incongrues [58].

Par exemple, une expression faciale triste agit comme un stimuli inné répulsif, décourageant les actions à l'origine de la tristesse chez l'autre individu, et motivant les comportements visant à l'atténuer [185]. De même, une expression faciale transmettant de la colère constitue un important signal permettant de modifier le comportement, particulièrement dans des situations d'interactions sociales impliquant des rapports hiérarchiques [58, 186, 187].

1. Définir des expressions faciales émotionnelles représentatives

Au cours des travaux sur l'Holodeck Safran, nous avons défini un état émotionnel neutre et 5 autres états émotionnels chez les personnages virtuels : content, mécontent, en colère, surpris et sceptique.

Dans un premier temps, les expressions faciales émotionnelles ont été dessinées de manière empirique, à partir de la perception des développeurs. Pour cela, l'outil d'animation Morph3D a été utilisé.

Cependant, rien ne garantit que la perception des développeurs et que les méthodes utilisés aient permis de dessiner des expressions faciales émotionnelles suffisamment représentatives.

2. Définir des niveaux d'intensité pertinents pour des expressions faciales émotionnelles

Lors de ces travaux sur l'Holodeck Safran, nous avons aussi identifié la nécessité d'utiliser différents niveaux d'intensité. Nous les avons fixé au nombre de 4 pour chaque émotion.

Il peut en effet être nécessaire de définir des niveaux d'intensité pour une expression faciale émotionnelle. Modifier cette intensité permet de moduler le stimuli transmis par le personnage virtuel, ce qui peut être nécessaire en fonction du contexte d'interaction. Par exemple, une expression faciale de colère doit être nuancée selon s'il s'agit d'une situation de gestion de crise au sein d'une équipe, ou d'une négociation infructueuse avec un client.

Pour définir le premier niveau de perception de l'expression, il est également nécessaire de se demander à quel moment, entre une expression neutre et une expression maximale, un utilisateur va commencer à percevoir l'émotion.

Enfin, il faut aussi se demander où placer le dernier niveau sur l'intensité maximale.

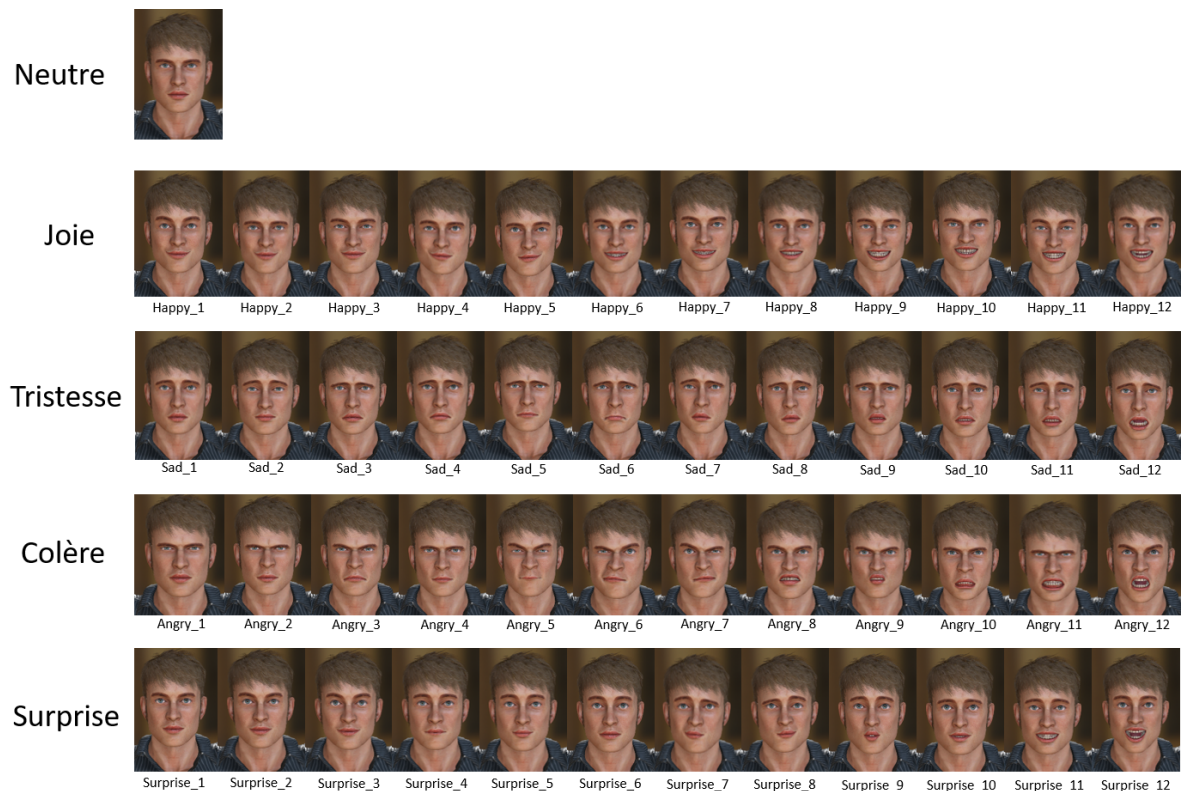


FIGURE 5.1: À intensité maximale, configurations de Character Creator 3 pour les émotions joie, tristesse, colère et surprise

Il peut en effet être problématique d'atteindre certaines intensités d'expression, pouvant paraître caricaturales ou exagérées.

3. Problématique des outils

Aujourd'hui, la majorité des outils commerciaux spécialisés dans la création de personnages virtuels, permettent de modifier une expression faciale en agissant sur des paramètres de déformation d'un visage.

Ces paramètres sont notamment déjà prédéfinis pour certaines expressions faciales émotionnelles courantes (joie, tristesse, surprise, etc.). Néanmoins, la définition de ces expressions n'est pas standardisée d'un outil à l'autre, et certaines variations importantes peuvent être relevées.

Lors des premiers travaux sur l'Holodeck Safran, nous avons utilisé Morph3D. Nous avons choisi cet outil pour sa simplicité. À l'exception du scepticisme, il proposait en effet un paramètre par émotion.

D'autres outils, proposent en revanche différentes configurations pour la même émotion. Character Creator 3 (CC3) propose par exemple 12 configurations différentes pour chaque émotion (Figure 5.1). Face à un tel éventail, on peut se demander quelles sont les plus pertinentes. Il est notamment probable que certaines de ces configurations puissent sembler étranges ou exagérées.

De plus, certaines peuvent se révéler ambiguës. C'est par exemple le cas entre les configurations "Happy_1" (joie) et "Surprise_3". Pour ces deux configurations, il semble assez délicat de les différencier spontanément (Figure 5.2).

Ces différences inter- et intra-outils sont problématiques, car elles ne permettent pas de garantir la pertinence de l'expression faciale, sans une étude préalable basée sur des évaluations subjectives.

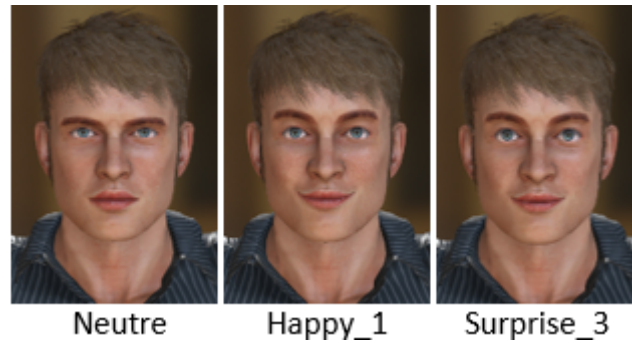


FIGURE 5.2: Ambiguïtés entre certaines configurations de Character Creator 3 pour les émotions joie et surprise

4. Nécessité d'une approche d'évaluation subjective

La perception humaine est un des outils les plus puissants pour mesurer l'expressivité d'un personnage virtuel [188]. Par le biais d'évaluations subjectives, chercher à analyser la perception de l'utilisateur permet d'établir si celle-ci est conforme aux attentes et aux objectifs du système.

De plus, des évaluations basées sur la perception sont particulièrement nécessaires dans un contexte où les visages virtuels sont utilisés pour transmettre un contenu affectif [177].

Analyser la perception d'une population de sujets, face à un éventail d'expressions faciales émotionnelles, paraît donc être une méthode pertinente afin d'en garantir la pertinence.

5. Pertinence des expressions faciales émotionnelles de l'Holodeck Safran

Dans la continuité des travaux de l'Holodeck Safran, nous avons voulu vérifier si les configurations des expressions faciales émotionnelles étaient pertinentes.

Afin de vérifier la pertinence des expressions faciales émotionnelles nous avons ainsi étudié ces expressions afin de les qualifier à partir de la perception subjective d'une population de sujets¹.

Au cours de cette étude, nous avons proposé un processus expérimental et une méthodologie afin d'analyser si les expressions faciales émotionnelles des personnages virtuels de l'Holodeck Safran avaient été dessinées de manière représentative. Basé sur une évaluation subjective des expressions par une population, nous avons donc appliqué ce processus au cours d'expérimentations et étudié les résultats.

Les résultats nous ont permis d'établir que les dessins des expressions étaient insatisfaisants. Outre le dessin de l'expression faciale, la méthode de définition des niveaux d'intensité a aussi montré des lacunes.

Nous avons aussi observé des variations de la perception des expressions, selon le personnage sur lequel elles avaient été dessinées. Ces résultats nous ont amené à nous interroger au sujet de l'impact du modèle 3D de base, sur la perception des expressions.

Enfin, nous avons également observé des variations en fonction du sexe des sujets. Cependant, ces variations peuvent avoir été influencées par les lacunes dans la manière de dessiner les expressions et d'en fixer les niveaux d'intensité.

Il est donc nécessaire de revoir dans un premier temps ces expressions faciales émotionnelles, afin de garantir leur pertinence et celle de l'outil d'apprentissage les intégrant.

1. Cette étude préliminaire est disponible en Annexe 32

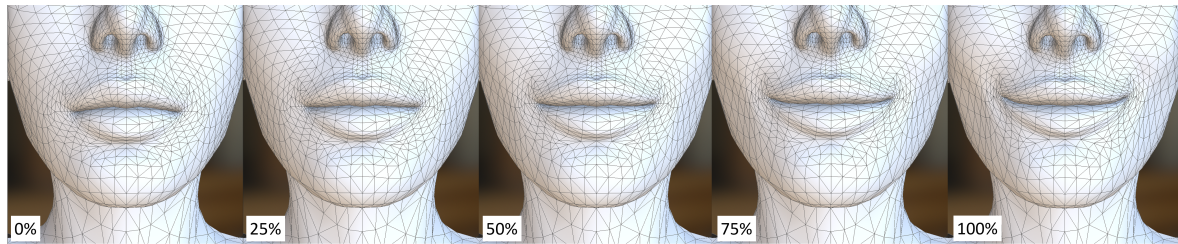


FIGURE 5.3: Exemple : positions des points du maillage du visage féminin de base de Character Creator 3, pour différentes valeurs du blendshape "Mouth Smile".

II État de l'art

Dans cette section, nous cherchons donc à analyser la littérature. Nous souhaitons recenser les différentes méthodes d'animation et établir s'il existe des manières standardisées de dessiner des expressions faciales émotionnelles pour chacune des émotions identifiées.

Nous cherchons également à voir si des méthodes permettant de fixer des niveaux d'intensité sont présentes dans la littérature.

Nous analysons aussi la littérature afin de déterminer si d'autres méthodes d'évaluation subjectives d'expressions faciales émotionnelles y sont proposées.

À l'issue de cette analyse, nous chercherons à modifier le dessin de nos expressions, puis à conduire de nouvelles expérimentations permettant de les qualifier.

Afin de pouvoir définir les expressions faciales émotionnelles de manière pertinente, il nous a donc semblé nécessaire d'analyser la littérature afin de répondre aux questions suivantes :

- Comment définir une expression faciale émotionnelle correspondant aux états émotionnels satisfait, mécontent, en colère, surpris et sceptique ?
- Comment évaluer la perception des expressions faciales émotionnelles ?
- Comment fixer les niveaux d'intensité des expressions faciales émotionnelles ?

1. Méthodes d'animation faciales

Comme le rapporte Liu [54], il existe plusieurs principes d'animation permettant d'animer des visages virtuels afin de dessiner des expressions faciales émotionnelles :

- Méthode par "*blendshapes*".

La méthode dite "par *blendshapes*" (ou "interpolation de formes") fait partie des plus largement utilisées.

Elle consiste à déformer et interpoler, dans le même temps, certaines formes issues d'un maillage (ici, celui d'un visage).

Les animateurs créent différentes poses clés du visage et le système interpole automatiquement les points du maillage entre eux, généralement de manière linéaire. L'animateur va ainsi manipuler des poids appliqués à des sous-maillages, afin d'en contrôler les degrés de déformation. Ces éléments manipulés, appelés *blendshapes* (ou "*morph targets*"), vont donc décrire la translation d'un ensemble de points vers une nouvelle position définie dans l'espace [189] (Figure 5.3).

Cependant, étant donné la complexité de construction des courbes du visage, cette méthode nécessite d'ajuster au préalable les déformations, en nombre conséquent et suffisant, couvrant un large éventail d'expressions faciales. Il est également nécessaire de les définir spécifiquement pour chaque modèle de visage, ce qui peut s'avérer fastidieux.

Néanmoins, bon nombre d'outils se servent d'un ou plusieurs maillages de visages de base génériques, ayant une expression faciale neutre.

Il utilisent ensuite des *blendshapes* afin d'en modifier également les attributs (forme et taille de différents éléments : nez, joues, sourcils, menton, etc.).



FIGURE 5.4: Méthode d'animation faciale par "squelettage" [54]

Aujourd'hui, pour animer le visage d'un personnage virtuel, un grand nombre de logiciels commerciaux d'animation appliquent cette méthode. C'est le cas notamment de Maya² et 3D Studio Max³, mais aussi de logiciels spécialisés dans la création de modèles humains 3D tels que Character Creator 3⁴, Morph3D ou encore Daz 3D⁵.

— Le "squelettage" (ou "*bone-based rigging*").

Le "squelettage" consiste à animer le visage à partir d'un squelette lié au maillage et le déformant lors de l'animation (Figure 5.4). En modifiant les valeurs de rotation des os du squelette, l'animateur va déformer le visage et simuler la contraction de ses muscles.

Cette technique permet de résoudre certains problèmes liés aux interpolations des méthodes par blendshapes, tels que la limitation des possibilités aux déformations pré-établies.

Néanmoins, elle nécessite un travail long et fastidieux dans la modélisation du squelette sur un visage entier. Le squelette doit en effet être de grande qualité afin de permettre une animation réaliste.

— Approches "basées déformation".

Les approches "basées déformation" consistent à déformer manuellement le maillage du visage. En manipulant directement les formes d'une enveloppe du maillage, l'animateur va réaliser les expressions faciales.

Ces méthodes sont fastidieuses. Elles nécessitent de modifier manuellement chaque point de l'enveloppe, à chaque image de l'animation. De plus, les déformations peuvent manquer de précision en fonction de la complexité de l'enveloppe définie.

— Approches "basées codage d'expression".

Les approches "basées codage d'expression" visent à décrire les mouvements du visage (dits "actions"), correspondant à l'expression. L'animateur va utiliser des paramètres correspondant aux actions définies par la méthode de codage d'expression. Ces paramètres déforment le maillage du visage de sorte à produire l'action correspondante.

Cette méthode nécessite au préalable un travail de définition des paramètres pour les associer à des déformations du maillage. C'est pourquoi certains auteurs de la littérature combinent cette méthode avec une méthode par blendshapes [189].

— Approches "par modélisation musculaire".

Certaines méthodes tentent de simuler le comportement du visage au plus proche possible de son anatomie, en cherchant à simuler le comportement de ses muscles.

2. <https://www.autodesk.com/products/maya/overview>

3. <https://www.autodesk.eu/products/3ds-max/overview>

4. <https://www.reallusion.com/character-creator/>

5. <http://www.daz3d.com/home>



FIGURE 5.5: Capture des expressions faciales sur le film *Avatar* de Cameron [55]

Ces méthodes visent à animer le visage en liant son maillage au comportement des muscles simulés, puis en y appliquant les déformations correspondantes.

Ces approches comportent néanmoins certaines limites. Ces méthodes sont complexes à définir et ajuster. Elles impliquent également des coûts de calcul importants.

— Capture du mouvement (*motion capture*).

Afin de capter les subtilités des expressions faciales, il est possible de capturer les animations directement depuis de vrais visages et de les appliquer à un maillage.

Utilisées notamment dans le cinéma (Figure 5.5⁶), ces méthodes obtiennent des résultats très performants. Cependant, elles nécessitent de mobiliser des acteurs pour jouer les expressions faciales, ainsi qu'un matériel important pour atteindre un haut niveau de qualité.

2. Définir une expression faciale émotionnelle sur un personnage virtuel

Afin de pouvoir définir une expression faciale révélant une émotion, il est nécessaire de caractériser et décrire les mouvements du visage. Il est alors possible d'utiliser ensuite ces descripteurs pour dessiner l'expression.

Des techniques de codage d'expressions existent pour décrire les expressions faciales. Tout en caractérisant les mouvements du visage, elles visent à fournir des bases de données d'expressions et de muscles faciaux. Plusieurs de ces méthodes sont fréquemment citées dans la littérature.

2.1. *Facial Action Coding System* (FACS)

Parmi ces méthodes, nous retenons *Facial Action Coding System* (FACS). FACS est une méthode de description basée sur l'analyse des muscles faciaux.

S'appuyant sur les travaux de l'anatomiste Hjortsjö [190], Paul Ekman et Wallace Friesen ont défini FACS en 1976. Ils ont publié un premier manuel en 1978 [191], puis Ekman, Friesen, et Hager ont ensuite publié une mise à jour importante de cette méthode en 2002 [192].

FACS permet de couvrir un large panel très détaillé de mouvements faciaux. Il permet également d'importantes distinctions des mouvements des sourcils, des paupières et du front [54].

Le principe consiste à décrire les expressions faciales en les décomposant en *Action Units* (AU) correspondant à des mouvements du visage et où chacune de ces AUs est associée aux muscles sous-jacents responsables du mouvement [175].

44 AUs sont définies. Elles correspondent à des systèmes musculaires faciaux dont elles décrivent les mouvements (e.g. remontée de la partie interne des sourcils, remontée des joues, abaissement des coins externes des lèvres, etc.) [57].

6. Source : <https://www.fxguide.com/fxpodcasts/fxpodcast-dr-mark-sagar/>

Le principe consiste à faire en sorte que chaque AU soit une unité minimale et indivisible. En combinant différentes AUs entre elles, il est ainsi possible d'obtenir différentes expressions faciales [54].

Chaque AU est identifiée par un nombre associé. Par exemple, l'AU correspondant au plissement de la peau du nez vers le haut est identifié par l'AU 9, l'ouverture de la lèvre inférieure l'est par l'AU 16. FACS définit également des intensités pour les Actions Units, en associant son numéro à une lettre de A à E [192]. Cette annotation permet de définir un intervalle allant de l'intensité minimale à l'intensité maximale :

- A : Trace de l'action
- B : Action légère
- C : Action marquée ou prononcée
- D : Action sévère ou extrême
- E : Intensité maximale de l'action

FACS permet aussi de définir des expressions faciales asymétriques. Ainsi, les lettres R et L permettent de définir des actions respectivement présentes sur les côtés droit et gauche du visage. Enfin, la lettre U indique une action unilatérale n'ayant pas un côté en particulier concerné.

Ekman a aussi identifié 6 émotions universelles [193] : peur, colère, surprise, dégoût, tristesse et joie. En se basant sur FACS, Friesen et al. [59] ont proposé EmFACS, une combinaison d'AUs pour chacune de ces émotions (Table 5.1). Amini et Lisetti [57] rapportent que Friesen et Ekman ont utilisé FACS sur des sujets issus de différentes régions du monde, et ont remarqué une universalité inter-culturelle dans les réactions physiques émotionnelles. Ils en ont déduit que les gens ont une interprétation et une compréhension native des expressions faciales émotionnelles, indépendamment de leur contexte culturel [57].

Parmi les 5 émotions que nous avons identifiées, nous retrouvons la colère et la surprise. Pour les émotions "content" et "mécontent", nous formulons l'hypothèse que leurs compositions en AU peuvent potentiellement s'approcher respectivement des émotions joie et tristesse de Ekman.

Certains auteurs de la littérature proposent des compositions d'AUs supplémentaires pour ces 4 émotions (joie, tristesse, colère, surprise). L'ensemble des AUs proposées et basées sur la dernière version de FACS (2002) [192], sont visibles en Figure 5.6.

Cependant, ces propositions montrent certaines différences notables (Table 5.1).

Le scepticisme est la seule de nos expressions n'étant pas définie par Ekman.

Néanmoins, Benitez-Quiroz et al. [61] proposent une expression faciale pouvant s'en rapprocher : la "*not face*".

Ces auteurs ont cherché à définir une composition d'AUs correspondant à une expression faciale exprimant une négation. Pour ce faire, ils sont partis de l'hypothèse que cette expression faciale peut être composée d'actions également présentes dans des expressions exprimant un jugement négatif moral (colère, dégoût, dédain).

À partir d'expérimentations, ils ont ainsi composé une expression faciale depuis des AUs utilisées pour ces trois émotions (Table 5.1). Leur composition emprunte l'AU 4 (abaissement et rapprochement des sourcils) à la colère, l'AU 17 (élévation du menton) et l'AU 24 (pincement des lèvres) au dégoût, ainsi que l'AU 14 (plissement externe des lèvres) au dédain.

Ils ont ensuite validé cette composition à partir d'autres expérimentations basées sur des banques d'images d'expressions faciales liées à une expression de négation.

FACS comporte néanmoins certaines limites à prendre en compte.

Le système concerne uniquement des changements locaux évidents du visage et ignore tous les changements subtils pouvant être difficiles à distinguer [54]. Essa et Pentland [194] citent notamment les mouvements des yeux et des lèvres, comme difficiles à décrire avec FACS. Certains auteurs soulignent aussi que les expressions faciales émotionnelles spécifiées par FACS peuvent paraître exagérées [195, 196].

Enfin, les distinctions de variation d'intensité des émotions sont assez limitées. Établies de manière ordinaire, les mesures d'intervalle entre chaque niveau ne sont pas définies, ce qui peut amener des définitions subjectives de ces différents jalons [195].




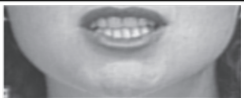













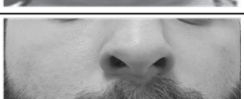
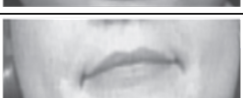
1	Remontée de la partie interne des sourcils		15	Abaissement des coins externes des lèvres	
2	Remontée de la partie externe des sourcils		16	Ouverture de la lèvre inférieure	
4	Abaissement et rapprochement des sourcils		17	Élévation du menton	
5	Ouverture entre la paupière supérieure et les sourcils		20	Étirement externe des lèvres	
6	Remontée des joues		23	Tension refermante des lèvres	
7	Tension de la paupière		24	Lèvres pressées (pincement des lèvres)	
9	Plissement de la peau du nez vers le haut		25	Ouverture de la bouche et séparation légère des lèvres	
10	Remontée de la partie supérieure de la lèvre		26	Ouverture de la mâchoire	
12	Étirement du coin des lèvres		38	Dilatation des nasaux	
14	Plissement externe des lèvres (fossette)				

FIGURE 5.6: Actions Units FACS [56] proposées pour les 5 émotions identifiées (joie, tristesse, colère, surprise, scepticisme) dans la littérature [57, 58, 59, 60, 61]

Malgré ces limites, FACS reste le système le plus utilisé aujourd'hui. Il a été initialement conçu pour analyser les expressions faciales naturelles.

Cependant, de nombreux auteurs soulignent qu'il s'est avéré être utilisé, ces dernières décennies, comme un standard dans la production d'expressions faciales sur des personnages virtuels [54, 189, 177, 175, 58, 197].

2.2. Autres méthodes de définition d'expressions

D'autres méthodes existent pour définir des expressions faciales émotionnelles :

- *MEPG-4 Facial Animation*. Basée sur le standard ISO MPEG-4 sorti en 1999 (ISO 14496-1) [198], cette méthode définit différents paramètres standardisés d'un visage en train de parler. Elle est principalement utilisée dans le domaine académique afin de générer des expressions faciales [189, 199].

Le principe de fonctionnement de cette méthode comporte des similarités avec FACS. La tête est divisée en 84 points de contrôle ("*Feature Points (FP)*") liés à la forme de différentes zones du visage [54].

- MAX ("*Maximally Discriminative Facial Movement Coding System*")

Proposée par Izard en 1979 [200], cette méthode repose sur l'analyse de ralenti vidéo. Elle vise à décortiquer les mouvements vidéo afin de les analyser, les caractériser et les associer à une émotion.

TABLE 5.1: Composition d'expressions faciales émotionnelles en Action Units FACS (2002) dans la littérature

Content (Happy)											
Actions Unit (AU)	1	6B	7	12E	14	25B					
(Friesen et al., 1983) [59]		X		X							
(Parke et Waters, 2008) [60]	X	X		X	X						
(Tinwell et al., 2011) [58]	X	X	X	X							
(Amini et Lisetti, 2013) [57]		X		X		X					
Mécontent (Sad)											
Actions Unit (AU)	1E	4C	15E	23	38						
(Friesen et al., 1983) [59]	X	X	X								
(Parke et Waters, 2008) [60]	X	X	X	X							
(Tinwell et al., 2011) [58]	X	X	X	X	X						
(Amini et Lisetti, 2013) [57]	X	X	X								
Colère (Angry)											
Actions Unit (AU)	2	4E	5B	7B	9	10	17	20	23A	24B	26
(Friesen et al., 1983) [59]		X	X	X					X		
(Parke et Waters, 2008) [60]	X	X		X	X	X		X			X
(Tinwell et al., 2011) [58]		X		X			X			X	
(Amini et Lisetti, 2013) [57]		X	X	X					X	X	
Surprise (Surprise)											
Actions Unit (AU)	1E	2E	5B	15	16	20	26E				
(Friesen et al., 1983) [59]	X	X	X				X				
(Parke et Waters, 2008) [60]	X	X	X	X	X	X	X				
(Tinwell et al., 2011) [58]	X	X	X				X				
(Amini et Lisetti, 2013) [57]	X	X	X				X				
Scepticisme ("Not face")											
Actions Unit (AU)	4	14	17	24							
(Benitez-Quiroz et al., 2016) [61]	X	X	X	X							

Cette méthode admet certaines limites identifiées dans la littérature. Moins compréhensible que FACS, elle ne fait notamment pas de différences entre certains éléments distincts d'une expression faciale (e.g. partie interne et externe des sourcils)[197, 201].

3. Évaluer la perception d'une expression faciale émotionnelle

Bon nombre de travaux utilisent des évaluations subjectives, afin de valider des expressions faciales. La plupart de ces travaux demandent aux sujets de sélectionner l'émotion perçue sur une expression face à laquelle ils sont confrontés [57, 182, 202].

Par exemple, pour chercher à valider leurs hypothèses sur le dessin de leurs expressions faciales émotionnelles à partir de FACS, Amini et Lisetti [57] ont eu recours à des évaluations subjectives de ce type. Ils ont demandé à des sujets de reconnaître l'émotion perçue sur une série d'images ou de vidéos générées par leur système. Dans une liste, les sujets devaient sélectionner l'émotion perçue sur l'image. Pour évaluer l'impact des modes de rendu de rides expressifs sur la perception d'une expression faciale virtuelle, Courgeon et al. [177] ont également eu recours à des évaluations subjectives. Le principe consistait là aussi à demander aux sujets de définir leur perception, face à plusieurs animations et images statiques représentant des expressions faciales émotionnelles, générées à partir de modes de rendu différents.

Pour une expression faciale émotionnelle, il est aussi envisageable de proposer aux sujets de définir une valeur de perception selon plusieurs émotions différentes.

Spencer et al. [203] ont ainsi confronté leurs sujets à des images de différentes expressions. À partir d'échelles de Likert, les sujets devaient alors évaluer successivement l'intensité de chaque émotion, perçue sur l'expression faciale.

Wagels et al. [204] utilisent un autre principe intéressant, pouvant être réutilisé pour déterminer à quel moment débute la perception d'une expression faciale émotionnelle.

Leurs travaux cherchent à évaluer l'impact de la testostérone sur la distance personnelle dans un contexte social menaçant.

Ils utilisent un paradigme dit de "*stop-distance*" : un personnage virtuel s'approche des sujets, et ces derniers doivent arrêter sa progression lorsqu'ils estiment qu'il est trop proche. Les personnages disposent de différentes expressions faciales émotionnelles et attitudes : neutre, amical et en colère.

Certains facteurs peuvent influencer la perception des émotions chez des individus.

Calder et al. [202] ont produit une étude montrant que la perception de l'émotion de colère pouvait être affectée par l'âge des sujets. Ils ont constaté un taux de reconnaissance significativement inférieur pour leurs sujets âgés de 61 à 70 ans. À noter qu'ils ont également obtenu un résultat encore plus marqué pour l'émotion de peur. Sullivan et Ruffman [205] ont relevé la même chose pour la perception de la colère et de la tristesse.

Enfin, il faut de noter que certains biais peuvent être évités aisément. Courgeon et al. [177] ont anticipé deux d'entre eux :

- Un manque de familiarité avec le processus expérimental, pouvant affecter les descriptions des premières expressions perçues. Les auteurs ont ainsi inclus 4 expressions avant l'éventail d'expressions testées, servant ainsi de session d'entraînement.
- Un manque de spontanéité si les sujets prennent un temps de réflexion important avant de décrire leur perception. Pour assurer une spontanéité relative des réponses, les auteurs ont donc limité le temps de sélection à 30 secondes, pour toutes les émotions suivant celles d'entraînement.

4. Fixer des niveaux d'intensité pour une expression faciale émotionnelle

Plusieurs auteurs de la littérature fixent les niveaux de leurs expressions faciales émotionnelles arbitrairement.

Certains d'entre eux le font de manière linéaire [182, 206]. Amini et Lisetti [57] attribuent également arbitrairement des intensités différentes à leurs blendshapes, correspondant aux niveaux de FACS : 100% pour E, 85% pour D, 55% pour C, 30% pour B et 15% pour A.

À notre connaissance, il n'existe pas de travaux rapportant des expérimentations visant à établir des niveaux d'intensité d'expressions faciales émotionnelles.

Cependant, certains auteurs proposent aux sujets de trier des expressions faciales conformément à leur perception. Courgeon et al. [177] ont ainsi demandé aux sujets de trier des expressions faciales selon leur niveau d'expressivité perçue. Pour chaque émotion, les différentes expressions étaient d'intensité identique, mais générées selon des modes de rendu différents. Par ce moyen, les auteurs ont pu établir, quelles méthodes de rendu impliquaient un meilleur niveau d'expressivité perçue.

Les classements générés par le jugement humain permettent d'établir un aperçu d'une perception imparfaite [207]. En demandant aux sujets d'établir un classement sur leur perception, il est possible de relever des erreurs dans celle-ci.

Cette variabilité des classements permet ainsi de découvrir quelles comparaisons sont cognitivement difficiles pour les sujets.

Il peut donc être pertinent d'appliquer une méthode de tri pour déterminer les niveaux de perception des expressions faciales émotionnelles. En les faisant classer par les sujets puis en analysant les variations, il pourrait être possible d'établir des niveaux d'intensité pour lesquels la perception est ambiguë et définir ainsi des niveaux de perception.

5. Conclusions de l'état de l'art

Dans cette section, nous avons cherché à explorer la littérature afin de répondre à plusieurs questions soulevées par l'utilisation d'expressions faciales émotionnelles sur des personnages virtuels.

Nous avons vu que plusieurs méthodes existent afin de définir une expression faciale émotionnelle. *Facial Action Coding System* (FACS) est notamment une des méthodes les plus couramment utilisées. Pour celle-ci, nous avons pu recenser différentes façons plus ou moins proches de dessiner nos cinq expressions faciales émotionnelles.

Nous retenons donc cette méthode afin de caractériser les dessins de nos expressions.

Nous avons également relevé que plusieurs auteurs procèdent à des évaluations subjectives afin de qualifier des expressions faciales émotionnelles.

L'exploration de la littérature nous a notamment permis de noter que certains biais pouvaient être aisément contournés lors d'évaluations subjectives. Nous retenons qu'une phase de familiarisation avec le processus expérimental et une limitation du temps de réponse, peuvent être nécessaires afin de garantir un aperçu correct de la perception spontanée.

Enfin, nous avons observé que les auteurs définissaient généralement les niveaux d'intensité de manière arbitraire. En effet, nous n'avons pas trouvé de travaux cherchant à établir des niveaux à partir de méthodes expérimentales.

Nous avons en revanche relevé que certains auteurs proposent de trier des expressions en fonction de la perception des sujets. Établir de classements en fonction de la perception permet notamment d'identifier des perceptions ambiguës pour une perception générale.

Nous supposons donc que l'utilisation d'une méthode de tri pour déterminer des niveaux d'intensité peut être intéressant.

Dans la section suivante, nous nous basons sur ces méthodes recensées afin de dessiner nos expressions faciales émotionnelles, définir leurs niveaux d'intensité, puis d'en valider la pertinence.

Les manières de composer les expressions faciales émotionnelles différant selon les auteurs, nous cherchons également à analyser lesquelles sont mieux perçues pour une population de sujets.

III Dessin et évaluation d'expressions faciales émotionnelles en Réalité Virtuelle

Nous souhaitons repenser nos expressions faciales émotionnelles afin de les rendre plus pertinentes. Pour cela, nous voulons explorer l'idée de les définir à partir de la perception d'une population, recueillie en Réalité Virtuelle.

Une fois dessinées, nous désirons analyser la pertinence de ces expressions. Pour cela, nous trouvons intéressant d'en qualifier la perception et de la comparer à celle d'expressions relevées dans la littérature et proposées par l'outil d'animation.

1. Démarche générale

Pour mener cette étude, nous structurons la démarche en différentes étapes (Figure 5.7) :

1. Dessin des expressions.

Nous demandons à une population de sujets de dessiner eux-même les expressions en Réalité Virtuelle, puis nous cherchons à extraire les plus représentatives.

2. Définition des niveaux d'intensité.

Nous confrontons ensuite cette même population à différentes variations pour chaque expression dessinée, afin d'établir où situer avec pertinence leurs niveaux d'intensité.

3. Pré-sélection des expressions.

Pour chaque expression, un nombre important de dessins est proposé par l'outil Character Creator 3. Nous avons aussi relevé plusieurs manières de les dessiner dans la littérature.

Afin de pouvoir les comparer à celles dessinées lors des étapes précédentes, nous cherchons dans un premier temps à établir quelles manières de dessiner sont les plus représentatives pour ces deux ensembles d'expressions. Pour chaque expression, nous pré-sélectionnons donc une manière de dessiner proposée par l'outil, ainsi qu'une autre relevée dans la littérature. Nous serons ainsi en mesure de comparer trois manières de dessiner l'expression : celle dessinée par les sujets, celle pré-sélectionnée sur l'outil et celle pré-sélectionnée dans la littérature.

4. Évaluation des expressions.

Nous proposons à une autre population d'évaluer nos expressions, en les mélangeant avec d'autres manières de dessiner, issues de la littérature ou fournies par l'outil d'animation.

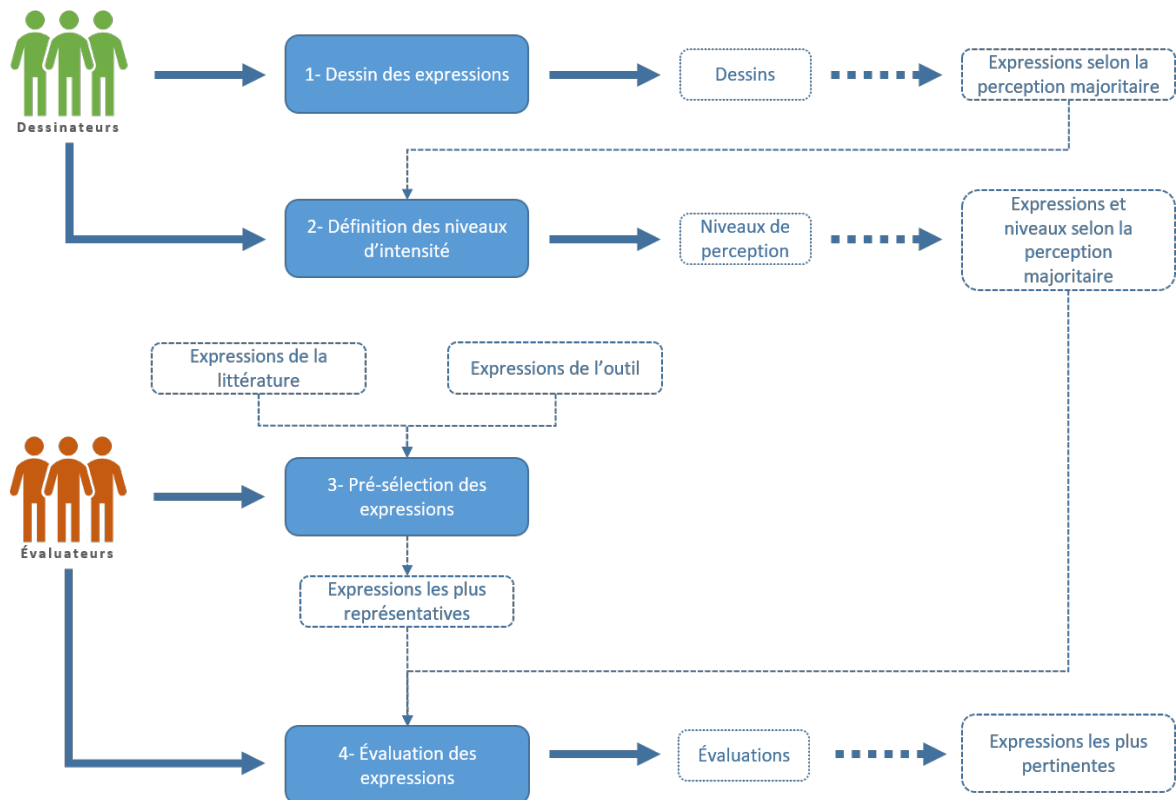


FIGURE 5.7: Démarche générale pour le dessin et l'évaluation d'expressions faciales émotionnelles

Si des variations importantes sont constatées, nous ne manquons pas de les analyser afin de chercher à établir quelles parties du visage en sont à l'origine.

Nous prenons soin de différencier les populations de sujets évaluant les expressions, à celles permettant de dessiner les émotions et de définir les niveaux d'intensité. Nous cherchons ainsi à éviter d'éventuels biais lors de l'évaluation des expressions.

2. Utilisation de l'outil Character Creator 3 (CC3)

2.1. Choix de l'outil

Lors des travaux sur l'Holodeck Safran, nous avons généré les personnages virtuels et leurs expressions à partir de l'outil Morph3D. Pour la suite de nos travaux, nous avons pris la décision de changer d'outil en utilisant Character Creator 3 (CC3).

Ce choix a été motivé par plusieurs caractéristiques de l'outil. CC3 propose un large panel d'expressions faciales déjà prédéfinies et permet d'accéder directement à des blendshapes correspondant à des AUs FACS.

Enfin, il permet aussi d'utiliser un éventail important de modèles 3D de base, ouvrant d'avantage de possibilités pour des études ultérieures.

2.2. Actions Units FACS et blendshapes CC3

Il a cependant été nécessaire d'analyser les différents blendshapes proposés par CC3, afin d'établir des correspondances avec les Actions Units FACS.

Pour chacune de nos émotions, nous avons établi une correspondance entre chaque AU mentionnée dans la littérature⁷, et les blendshapes de CC3⁸.

7. Voir Table 5.1

8. L'ensemble de ces correspondances est présenté en Annexe 37

Pour les valeurs attribuées aux blendshapes, nous avons choisi de reprendre les travaux d'Amini et Lisetti [57]. Nous avons précédemment relevé que ces auteurs fixaient les valeurs des blendshapes en fonction de leur valeur maximale, selon l'intensité des AUs FACS : 100% du maximum pour E, 85% pour D, 55% pour C, 30% pour B et 15% pour A.

Lorsque l'intensité d'une AU n'est pas spécifiée dans la littérature, nous prenons le parti de fixer l'intensité maximale du blendshape à 100% de sa valeur possible.

Après avoir effectué des tests unitaires sur les compositions d'expressions relevées dans la littérature, nous avons cependant été contraints d'appliquer certains ajustements lorsque des déformations semblaient exagérées⁹.

À noter que certaines Actions Units nécessitaient une composition de plusieurs blendshapes avec des valeurs différentes. Nous avons notamment composé la tension des paupières (AU 7) à partir des blendshapes *Eye_Wide* et *Eye_Squint*, en attribuant une valeur de *Eye_Wide* correspondant à 1/4 de celle de *Eye_Squint*. Nous avons aussi défini la valeur du blendshape *Mouth_Top_Lip_Up* à 1/2 de celle de *Mouth_Bottom_Lip_Under*, afin de dessiner l'élévation du menton (AU 17).

3. Expérimentations : dessin des expressions

Nous avons voulu proposer à une population de sujets de dessiner eux-mêmes les expressions en Réalité Virtuelle, à partir des AUs FACS. Nous souhaitons ainsi essayer d'en extraire une perception de la population, permettant de définir des compositions pertinentes des expressions.

3.1. Sujets "dessinateurs"

Afin d'éviter d'éventuels biais, nous avons pris soin de conduire cette expérimentation sur une population de sujets n'ayant pas participé à l'étude préliminaire.

Menée en collaboration avec Capgemini, l'expérimentation a été menée une population de sujets "dessinateurs" composée de 32 collaborateurs de l'entreprise. L'âge moyen des sujets était de 41 ans (± 12). La population était composée à 75% d'hommes pour 25% de femmes.

3.2. Prototype de dessin

Nous avons conçu un prototype en Réalité Virtuelle pour dessiner les expressions.

Les sujets y sont confrontés à quatre personnages virtuels identiques et d'expression neutre (Figure 5.8).

Au dessus de chaque personnage, une émotion et un niveau d'intensité sont indiqués.

Les utilisateurs ont alors la possibilité de dessiner cette émotion selon le niveau d'intensité, en utilisant des curseurs positionnés devant les personnages.

Chacun d'entre-eux correspond à une AU FACS et permet de modifier les blendshapes de CC3 correspondant.

À noter que pour l'expression *Sceptique*, nous avons inclus la possibilité de modifier de manière asymétrique l'AU 4 (ouverture entre la paupière supérieure et les sourcils) et l'AU 14 (plissement externe des lèvres).

N'ayant trouvé qu'un seul exemple correspondant dans la littérature, nous avons souhaité laisser aux sujets de dessiner l'expression de manière asymétrique sur ces AUs.

Pour chaque AU, un curseur correspondant à la déformation de chaque côté du visage était donc disponible.

Enfin, un bouton pour valider les quatre dessins est situé au dessus des personnage. Cliquer dessus permet d'enregistrer les valeurs de chaque curseur dans un fichier texte et de passer à une autre expression.

Nous avons conçu deux personnages de sexe différent sur lesquels dessiner les expressions : Aitor (masculin) et Mari (féminin).

9. Ces ajustements sont décrits en Annexe 38

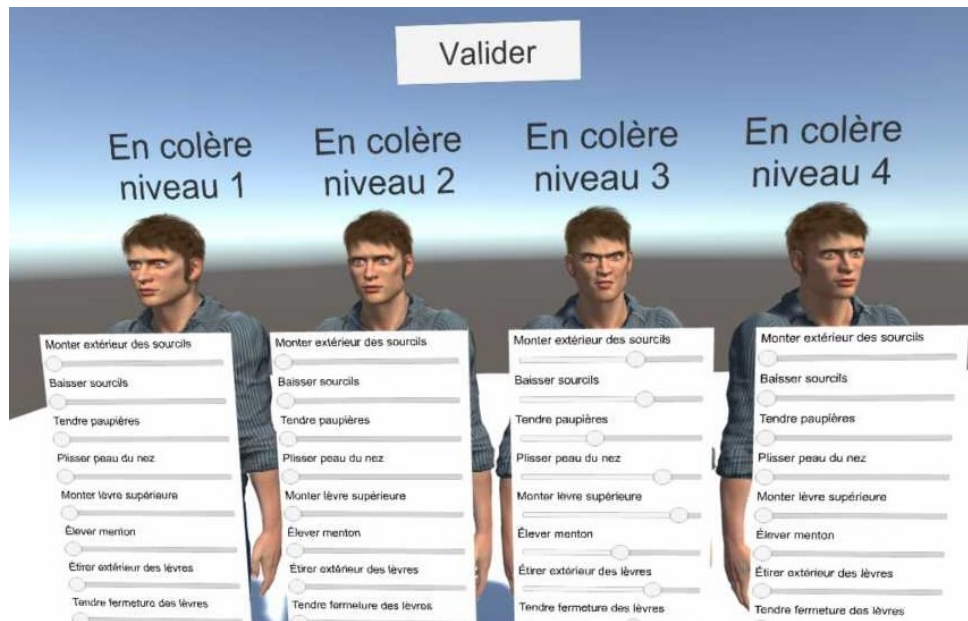


FIGURE 5.8: Prototype de dessin d'expressions faciales émotionnelles

Pour ce faire, les modèles de base fournis par CCC3 ont été utilisés (respectivement *CC3_Base Male* et *CC3_Base Female*).

3.3. Processus expérimental pour le dessin des expressions

Nous avons souhaité utiliser ce prototype afin de chercher à obtenir des expressions pertinentes depuis la perception d'une population donnée.

3.3.1. Dessin des expressions

Les sujets commencèrent par lire une notice d'information leur décrivant les objectifs et les consignes de l'expérimentation. Nous leurs indiquions notamment qu'ils étaient libres d'utiliser ou non les curseurs à leur guise.

Ils furent ensuite équipés d'un visiocasque HTC Vive et d'un serre-tête *Deluxe Audio Strap*.

L'écart inter-pupillaire des sujets était mesuré et le visiocasque était réglé en fonction de cette mesure.

Les sujets remplissaient ensuite le formulaire renseignant leur âge et leur sexe, puis étaient confrontés au premier dessin d'une expression.

Lors de l'état de l'art, nous avons relevé qu'il pouvait être nécessaire de s'affranchir d'éventuels biais liés à un manque de familiarité avec le processus expérimental. La première expression proposée aux sujets était donc une expression d'entraînement (la peur), afin de leur permettre de se familiariser avec le prototype et le processus expérimental.

Les expressions à dessiner ensuite furent donc nos cinq expressions, dans l'ordre suivant : *Content(e)*, *Mécontent(e)*, *En colère*, *Surpris(e)* et *Sceptique*. Chacune d'entre elles fut à dessiner deux fois, une fois sur chaque personnage.

Lors de l'expérimentation, les sujets étaient libres de se déplacer dans la zone virtuelle délimitée. Ils furent d'ailleurs sensibilisés au préalable à cette possibilité.

Ils pouvaient également prendre le temps qu'ils souhaitaient afin de dessiner les expressions.

3.3.2. Mesure et calcul de l'imprécision du positionnement des curseurs

Nous avons fait intervenir à nouveau les sujets deux semaines plus tard, afin d'obtenir des mesures supplémentaires et nécessaires à l'exploitation des résultats.

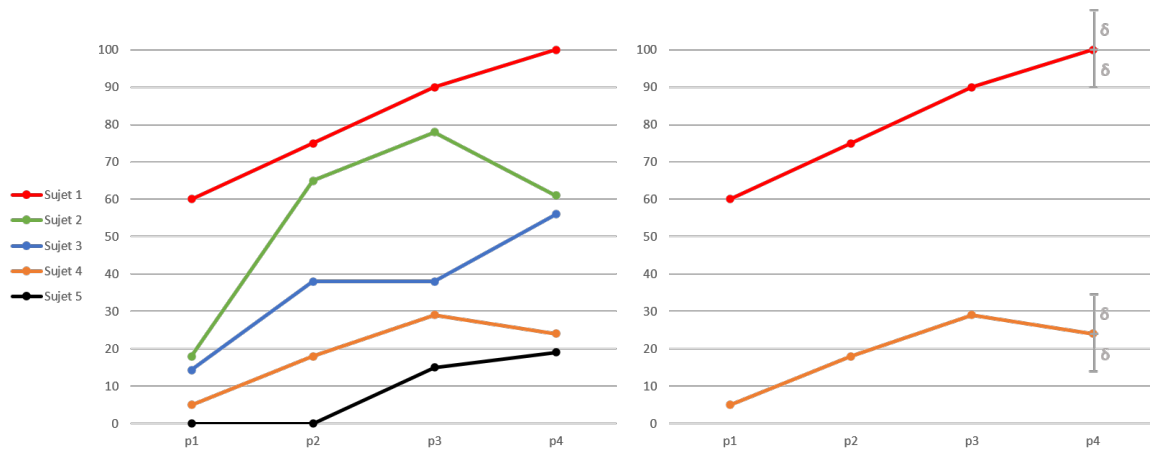


FIGURE 5.9: Exemple de représentation graphique des dessins pour une Action Unit d'une expression donnée, sans prendre en compte l'imprécision (gauche) et en prenant en compte une imprécision δ (droite)

Nous avons eu besoin de résoudre la problématique de l'imprécision du positionnement des curseurs par les sujets.

La position dans laquelle ils les placent est par nature imprécise. Lorsqu'un sujet souhaite placer un curseur sur la même intensité pour deux niveaux différents, sa valeur n'est pas forcément identique. Pour chaque curseur, nous avons donc souhaité définir une valeur d'imprécision (δ) indépendamment des sujets. Cette valeur correspond à l'écart de positionnement acceptable afin d'identifier une variation.

Pour la mesurer, nous avons demandé à nos sujets de repasser sur le prototype, en dessinant quatre fois chaque expression au même niveau d'intensité.

La notice d'information distribuée au préalable leur demandait d'utiliser tous les curseurs cette fois-ci, sans toutefois les placer à leurs positions maximale ou minimale.

Pour calculer cette valeur d'imprécision δ , nous centrons d'abord la position des 4 curseurs positionnés par le sujet, sur leur position moyenne. Chaque sujet nous permet ainsi d'obtenir 4 écarts, pour un curseur placé à la même position.

Nous déterminons ensuite notre seuil δ à partir duquel nous pouvons établir que le curseur change de position, depuis l'ensemble des écarts mesurés chez tous les sujets.

Ces écarts étant centrés sur une position moyenne, nous proposons de définir δ en calculant l'écart entre le 1^{er} et le 3^{ème} quartile de cet ensemble de variations.

3.4. Résultats du dessin des expressions

3.4.1. Méthodologie pour dessiner les expressions à partir de la perception majoritaire

Pour chaque niveau d'intensité, nous souhaitons agréger les différents dessins des sujets, afin d'arriver à obtenir un dessin d'expression avec lequel la majorité d'entre-eux est d'accord. De la sorte, nous proposons d'introduire la notion de dessin des expressions selon la *perception majoritaire* des sujets.

Pour cela nous disposons des valeurs des intensités des AUs définies par les sujets, sur chacun des quatre niveaux d'intensité.

Calculer la moyenne arithmétique des valeurs données par les sujets aurait été problématique. Par exemple, certaines valeurs anormales auraient biaisé les valeurs de certains niveaux, aboutissant ainsi à un dessin ne correspondant pas à la perception majoritaire.

Nous proposons d'utiliser une méthode consistant à effectuer un mode en deux temps :

1. Identifier un groupe majoritaire sur la façon de déplacer le curseur entre chaque niveau.
2. Se servir du groupe majoritaire pour définir la valeur des 4 niveaux d'intensité.

3.4.1.1. Étape 1 : identifier un groupe comonotone majoritaire

Pour chaque AU composant l'expression, nous disposons des valeurs définies par chaque sujet sur les 4 niveaux d'intensité (voir un exemple avec 5 sujets en Figure 5.9, gauche). Chaque dessin d'un sujet est ainsi défini par une fonction régissant les valeurs de ces points, que nous nommons respectivement p_1 , p_2 , p_3 et p_4 .

Nous proposons d'analyser la comonotonie de ces fonctions.

Nous nous référons à la définition de la comonotonie rapportée par Goubault [208] :

Comonotonie [208] :

Deux fonctions f et g sont dites comonotones si et seulement si il n'existe aucun couple de points (x, x') tels que $f(x) < f(x')$ et $g(x) > g(x')$.

Pour une AU, rassembler les dessins en groupes comonotones permet d'identifier les différentes dynamiques d'évolution des curseurs sur chaque niveau d'intensité.

Prenons l'exemple de l'AU 1 correspondant au haussement des sourcils. Nous allons différencier les sujets dessinant un haussement continu sur chaque niveau et ceux qui haussent les sourcils sur le premier niveau, puis baissant sur les niveaux suivants.

L'objectif est d'extraire l'ensemble des dessins évoluant majoritairement de la même manière. Cet ensemble est significatif lorsque ce groupe de dessins comonotones rassemble au moins 50% des dessins.

Si l'on reprend l'exemple présenté en Figure 5.9 (gauche), nous observons que les dessins des sujets 1, 3 et 5 sont comonotones et forment un groupe majoritaire. À noter que les dessins des sujets 2 et 4 ne sont pas comonotones entre eux, puisque nous avons $f_{s_2}(p_2) > f_{s_2}(p_4)$ et $f_{s_4}(p_2) < f_{s_4}(p_4)$.

Pour établir la comonotonie de deux dessins, nous analysons les valeurs de chaque niveau d'intensité, en prenant en compte l'imprécision δ que nous avons mesuré pour le curseur utilisé par les sujets.

L'exemple de la Figure 5.9 (droite) montre cette nécessité de prise en compte de l'imprécision. Pour une valeur d'imprécision $\delta = 10$, les dessins des sujets 1 et 4 sont comonotones : les sujets sont tous les deux d'accord sur l'évolution des différents niveaux d'intensité.

Sans la prise en compte de l'imprécision, les dessins ne seraient au contraire pas comonotones : les sujets seraient en désaccord sur l'évolution du 4^{ème} niveau d'intensité.

Nous proposons ainsi d'introduire la notion de δ -comonotonie :

δ -comonotonie :

Deux fonctions sont δ -comonotones si et seulement si il n'existe aucun couple de points (p_i, p_y) tels que :

$$f(p_i) - f(p_y) < -\delta \text{ et } g(p_i) - g(p_y) > \delta$$

3.4.1.2. Étape 2 : calculer les modes du groupe δ -comonotone majoritaire

À partir de ce groupe majoritaire de dessins δ -comonotones, nous proposons de définir l'intensité de l'AU pour chaque niveau d'intensité en calculant le mode sur les valeurs fournies par les sujets du groupe. Nous avons utilisé une méthode de calcul de modes à partir d'histogrammes proposée [209].

Le mode permet de se rapprocher des valeurs les plus représentées et il est moins sensible aux données parasites qu'une moyenne arithmétique (i.e. valeurs anormalement trop hautes ou trop basses).

3.4.1.3. Cas particulier : gestion de l'asymétrie de l'expression *Sceptique*

Pour l'expression *Sceptique* l'AU 4 (froncement des sourcils) et l'AU 14 (fossette) pouvaient être déformées indépendamment de chaque côté du visage. Les sujets disposaient de 4 curseurs correspondant aux AUs : 4L (côté gauche), 4R (côté droit), 14L (côté gauche) et 14R (côté droit). Pour ces deux AUs, certains sujets peuvent donc avoir déformé le côté gauche de manière plus importante, pendant que d'autres l'ont fait sur le côté droit.

Avant d'analyser la comonotonie des dessins de ces AUs, puis de calculer le mode du groupe δ -comonotone majoritaire, nous proposons de regrouper chaque AU selon le côté du visage le plus déformé.

L'objectif vise à pouvoir reproduire l'asymétrie si elle a été dessinée, en évitant que les valeurs mélangées ne biaisent les résultats.

Prenons l'exemple de l'AU 4 sur le premier niveau d'intensité, déformée par un groupe δ -comonotone majoritaire de 5 dessins selon la manière suivante :

- 3 dessins déforment plus l'AU 4L que l'AU 4R
- 2 dessins déforment moins l'AU 4L que l'AU 4R

Calculer le mode de l'AU 4L ne donnerait pas une valeur représentative de la perception des sujets, l'AU 4L ne correspondant pas au côté le plus déformé pour 2 sujets.

Pour résoudre cette problématique, nous proposons de regrouper et de traiter les valeurs de la manière suivante :

- l'AU 4+, regroupant les valeurs les plus déformées de l'AU 4 ;
- l'AU 4-, regroupant les valeurs les moins déformées de l'AU 4 ;
- l'AU 14+, regroupant les valeurs les plus déformées de l'AU 14 ;
- l'AU 14-, regroupant les valeurs les moins déformées de l'AU 14.

Il est ainsi possible d'identifier si un groupe δ -comonotone majoritaire existe pour chacune de ces AUs, puis d'en calculer le mode en conservant une asymétrie potentiellement dessinée par les sujets.

Pour choisir sur quel côté du visage dessiner la déformation ainsi obtenue, nous proposons d'attribuer la valeur de déformation la plus importante au côté le plus déformé par une majorité de sujets.

Si nous reprenons l'exemple ci-dessus pour l'AU 4, le côté le plus déformé est majoritairement le gauche (3 dessins sur 5). Nous dessinons donc l'expression en attribuant les valeurs suivantes pour l'AU 4 :

- AU 4L = $Mode(AU\ 4+)$
- AU 4R = $Mode(AU\ 4-)$

3.4.2. Résultats du dessins des expressions

Les résultats ont montré que les AUs de toutes les expressions avaient un groupe de dessins δ -comonotones majoritaire¹⁰.

Nous avons également observé que, d'un personnage à l'autre, les valeurs obtenues diffèrent pour la même AU.

Certaines AUs ne sont pas non plus utilisées pour certaines expressions des différents personnages.

C'est notamment le cas pour les expressions suivantes :

- *Mécontent(e)* : l'AU 1 (remontée de la partie interne des sourcils) d'Aitor
- *En colère* : l'AU 23 (tension refermante des lèvres) de Mari
- *Surprise* : l'AU 15 (abaissement des coins externes des lèvres) des deux personnages et l'AU 20 (étirement externe des lèvres) d'Aitor

10. L'ensemble des résultats obtenus sont disponibles en Annexe 39

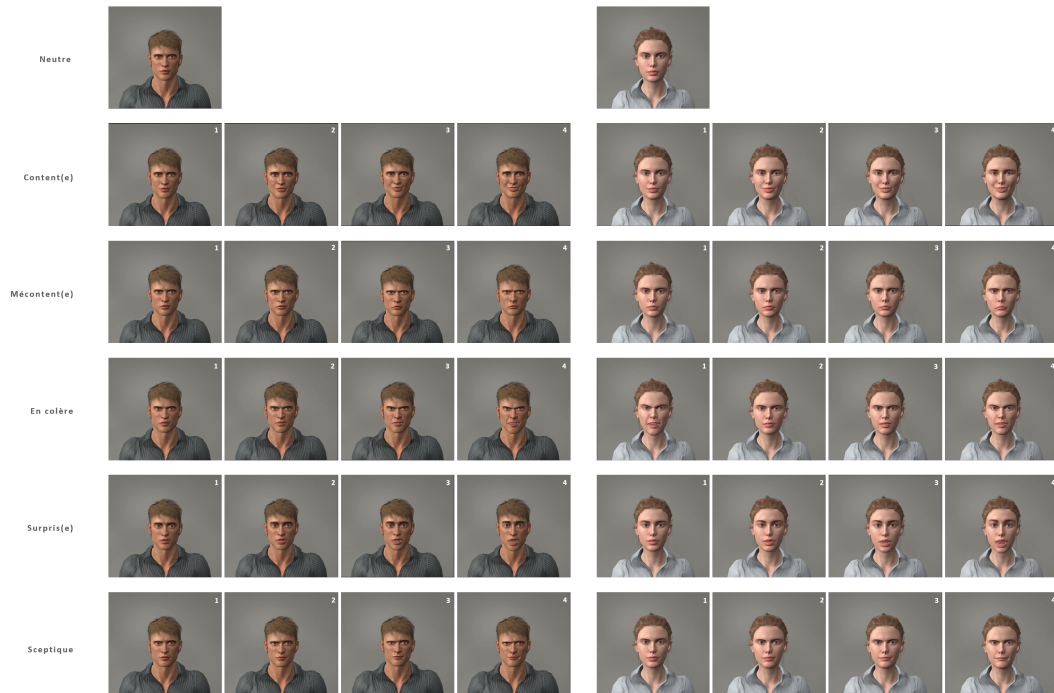


FIGURE 5.10: Expressions dessinées à partir de la perception majoritaire des sujets

Pour l'expression *Sceptique*, nous avons relevé que les côtés les plus déformés par les sujets sont opposés pour l'AU 4 (ouverture entre la paupière et les sourcils) et l'AU 14 (fossette).

L'AU 4L a été plus déformée que l'AU 4R, alors que l'AU 14R a été plus déformée.

Afin de dessiner cette expression, nous avons donc attribué les valeurs selon les correspondances suivantes :

- AU 4+ pour l'AU 4R
- AU 4- pour l'AU 4L
- AU 14+ pour l'AU 14L
- AU 14- pour l'AU 14R

La Figure 5.10 présente donc toutes les expressions obtenues à partir de la perception majoritaire, dessinées avec l'outil CC3¹¹.

3.5. Discussions sur le dessin des expressions

Pour chacune des AUs de chaque expression, nous avons été en mesure d'obtenir un groupe de dessins δ -comotonones majoritaire. Ceux-ci nous ont permis de dessiner les expressions sur 4 niveaux d'intensité, en fonction de la perception majoritaire de notre population de sujets.

Les résultats ont montré des différences d'utilisation et d'intensité des AU, en fonction du personnage (masculin ou féminins).

Ces observations viennent rejoindre nos précédentes suppositions sur la possibilité de variations liées aux différences entre les modèles 3D des personnages, ou encore à des effets inter-sexes.

Les résultats identifient des AUs non utilisées pour certaines expressions, selon le personnage. Pour le personnage masculin, la remontée de la partie interne des sourcils (AU 1) n'est pas utilisée pour l'expression *Mécontent(e)*. On observe le même effet pour l'étirement externe des lèvres (AU 20) avec l'expression *Surpris(e)*. Cependant, ces deux AUs sont utilisées sur le personnage féminin. Nous avons aussi relevé un effet inverse sur le personnage féminin. La tension refermante des lèvres (AU 23) n'est pas utilisée, alors qu'elle l'est sur le personnage masculin.

11. Pour rappel, les correspondances entre les AU FACS et les Blendshapes CC3 sont présentées en Annexe 37

Ces différences peuvent trouver plusieurs explications. La manière dont sont dessinés les modèles des personnages neutres peut accentuer la perception de ces déformations, ne nécessitant pas de modifications de la part des sujets. Il est également probable que pour ces AUs, la correspondance que nous avons établi avec les blendshapes de l'outil ne soient pas optimale.

Pour l'expression *Mécontent(e)* en particulier, comme nous n'avons pas trouvé de manières de définir cette expression dans la littérature, nous avons pris le parti d'utiliser les Actions Units définies pour exprimer la tristesse. La pertinence de cette démarche peut prêter à discussions.

Des études supplémentaires seraient donc nécessaires pour vérifier toutes ces suppositions. Elles pourraient consister à évaluer la perception de ces AU sur différents modèles de personnages neutres, ou encore à déterminer si d'autres blendshapes et d'autres intensités sont plus pertinents.

Lors de la phase d'évaluation que nous présentons dans les sous-section suivantes, nous prenons donc un soin particulier à analyser la pertinence de ces expressions.

Pour l'expression *Surprise*, l'abaissement des coins externes des lèvres (AU15) n'est en revanche pas utilisée sur les deux personnages.

Pour cette expression, plusieurs hypothèses tendent à nouveau à émerger.

Les exemples issus de la littérature établissent la présence de cette AU à partir d'études de visages réels présentant l'expression. Il est possible que cette analyse soit trop fine et ait identifié cette AU alors qu'elle n'est pas forcément indispensable pour percevoir l'expression.

Il est là aussi possible que les correspondances des AUs avec les blendshapes CC3 et leurs intensités ne soient pas optimales.

Là encore, d'autres études pourraient permettre de valider ces hypothèses et nous cherchons à analyser la pertinence de l'expression dessinée lors de la phase d'évaluation des expressions.

Nous avons permis aux sujets de dessiner l'expression *Sceptique* de manière asymétrique.

Les résultats ont montré qu'ils avaient effectivement tendance à dessiner une dissymétrie sur deux AUs : l'ouverture entre la paupière et les sourcils (AU 4), et le plissement externe des lèvres (ou fossettes, AU 14).

Il est intéressant de noter que ces deux déformations ont été effectuées de manière opposée par les sujets, sur les deux personnages. Ainsi, l'AU 4 a été plus déformée côté droit, alors que l'AU 14 l'a été plus souvent du côté gauche.

Lors de la phase d'évaluation des expressions, nous cherchons donc à analyser si l'ajout de cette dissymétrie rend l'expression plus pertinente que la méthode symétrique relevée dans la littérature.

Les résultats obtenus comportent néanmoins certaines limites.

À partir des intensités définies pour les AUs dans la littérature, nous avons borné les valeurs maximales de certains blendshapes. Il est donc probable que certaines déformations aient été placées au maximum, alors que les sujets auraient voulu l'accentuer encore. Pour l'éviter, effectuer des expériences sans borner ces valeurs peut être une solution.

Dans la littérature, les manières de caractériser les expressions que nous avons relevé sont toutes définies de manière symétrique. À l'exception de l'expression *Sceptique*, nous n'avons pas permis aux sujets de déformer les visages de manière asymétrique. Pour certaines expressions, nous avons voulu éviter de surcharger l'interface en rajoutant des curseurs supplémentaires. Cependant, il serait intéressant de reproduire l'expérimentation en incluant cette fonctionnalité. Il serait alors possible de comparer les résultats, afin d'observer si certaines expressions ont tendance à être dessinées de manière asymétrique.

Enfin, si les expressions ont été établis à partir des dessins des sujets sur 4 niveaux d'intensité, rien ne garantit que le premier niveau corresponde réellement au début de la perception de l'expression par la population de sujets. De même, il n'est pas non plus possible de garantir que les derniers niveaux d'intensité ne soient pas trop exagérés.

Dans la sous-section suivante, nous cherchons donc à établir plus précisément où positionner avec pertinence nos niveaux d'intensité, sur un espace partant de l'expression neutre et allant jusqu'au dernier niveau d'intensité dessiné.

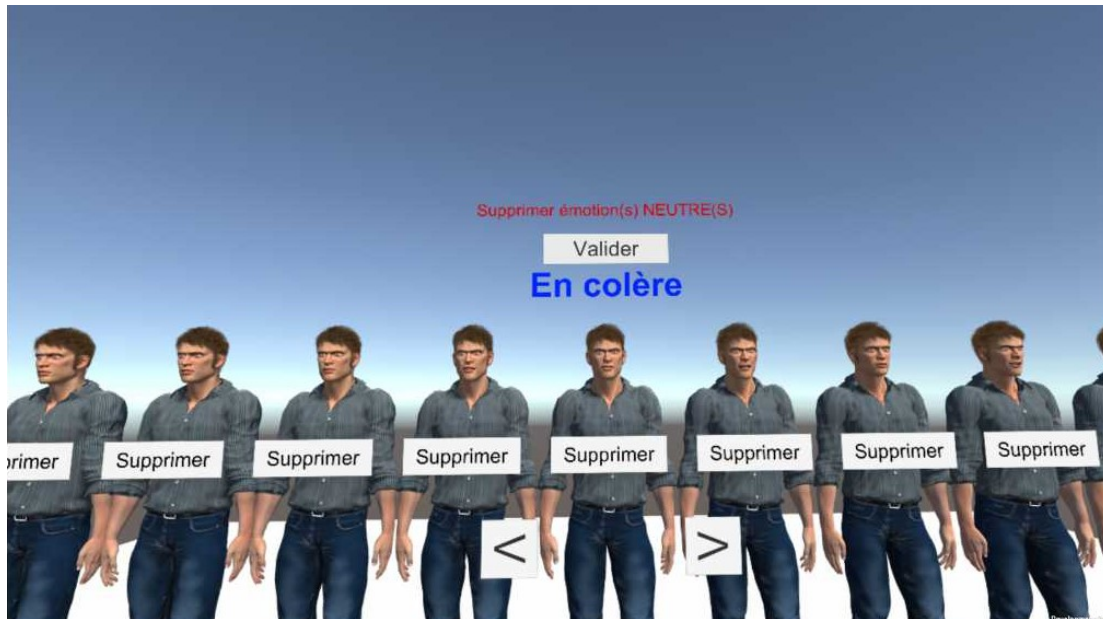


FIGURE 5.11: Prototype de tri, étape de suppression des expressions trop neutres

4. Expérimentations : définition des niveaux d'intensité

Comme nous venons de le souligner, rien ne garantit que les 4 niveaux d'intensité des expressions dessinées dans la partie précédente soient pertinents.

Nous souhaitons donc établir les niveaux d'intensité en nous basant à nouveau sur la perception de notre population de "dessinateurs". Sur un espace allant de l'expression neutre aux derniers niveaux d'intensité dessinés, nous avons ainsi cherché à répondre à plusieurs problématiques :

- Où commence réellement la perception de notre population, i.e. où fixer notre premier niveau d'intensité ?
- Où s'arrête la perception pertinente de notre expression pour cette même population ?
En d'autres termes, pour fixer notre dernier niveau d'intensité, nous souhaitons savoir à partir de quel moment l'expression paraît trop exagérée et/ou semble correspondre à une autre expression.
- Où positionner nos niveaux d'intensité intermédiaires (niveaux 2 et 3) ?

Pour chercher à y répondre, nous proposons de faire trier différents niveaux de l'expression aux sujets, en fonction de l'intensité qu'ils percevaient. En étudiant ainsi les variations par rapport à l'ordre d'intensité réel des expressions, nous souhaitons établir si les différences entre deux intensités sont suffisamment ambiguës, de sorte à pouvoir les grouper au sein d'un même niveau.

4.1. Prototype de tri

Comme pour le prototype de dessin, l'utilisateur est d'abord amené à remplir un formulaire dans une scène vide, renseignant son âge et son sexe.

Plusieurs personnages apparaissent ensuite devant lui, positionnés sur un tapis roulant. Chacun d'entre eux a la même expression faciale, mais avec une intensité différente. L'utilisateur peut faire défiler les personnages, en utilisant des boutons positionnés devant lui (Figure 5.11).

L'émotion concernée est mentionnée au dessus des personnages. Une consigne est également indiquée, invitant l'utilisateur à procéder en trois étapes distinctes correspondant aux problématiques que nous avons identifiées :

- Supprimer l'(es) expressions(s) perçue(s) comme *Neutre*.
Pour cela, des boutons permettant de faire disparaître les personnages sont positionnés devant eux (Figure 5.11).
Une fois que l'utilisateur considère qu'il n'y a plus de personnages neutres sur le tapis, il peut utiliser un bouton *Valider* lui permettant de passer à l'étape suivante.



FIGURE 5.12: Prototype de tri, étape du tri des expressions en fonction de leur intensité

- Supprimer l'(es) expression(s) perçue(s) comme exagérée(s) ou correspondant à une autre expression.
Là encore, des boutons permettant de supprimer les personnages et de passer à l'étape suivantes sont disponibles.
- Trier les personnages restants, par intensité croissante perçue.
Après avoir supprimé toutes les expressions non pertinentes, l'utilisateur doit finir par positionner les personnages selon le niveau d'intensité perçu, par ordre croissant allant de gauche à droite. Pour ce faire, il dispose de boutons permettant de permuter la position entre deux personnages voisins (Figure 5.12).
Une fois que les personnage lui semblent être dans le bon ordre, il peut passer à l'expression suivante en utilisant le bouton *Valider*.

Enfin, le système enregistre tous les choix de l'utilisateur dans un fichier texte, lorsque toutes les expressions ont été triées.

4.2. Processus expérimental pour la définition des niveaux d'intensité

4.2.1. Traitements préliminaires

Afin de représenter chaque expression sur un espace allant de l'expression neutre à celle d'intensité maximum, nous avons ajouté des niveaux d'intensité intermédiaires. Nous avons souhaité ajouter 3 niveaux entre chaque niveau, nous permettant de dessiner l'expression sur 16 intensités différentes.

Pour ce faire, effectuer une interpolation linéaire nous a semblé être le meilleur compromis. Nous avons en effet tenté des interpolations d'ordre supérieur, mais dans certains cas, les résultats obtenus ne se sont pas avérés satisfaisants. Par exemple, certains blendshapes pour lesquels les premiers niveaux ont une intensité nulle, auraient obtenu des valeurs négatives sur les niveaux intermédiaires¹².

4.2.2. Processus expérimental

Nous avons à nouveau sollicité les sujets "dessinateurs" intervenus lors du dessin des émotions, afin qu'ils passent sur le prototype de tri pour nous aider à fixer des niveaux d'intensité correspondant à leur perception.

12. Voir exemple en Annexe 40

Avant de commencer l'expérience, les sujets furent sensibilisés aux consignes et au fonctionnement du prototype. Il leur a notamment été précisé qu'ils pouvaient librement supprimer tous les personnages ou aucun d'entre eux.

Comme lors des expérimentations précédentes, les sujets furent équipés d'un visiocasque HTC Vive agrémenté d'un serre-tête *Deluxe Audio Strap*. Là encore, le visiocasque fut réglé en fonction de leur écart inter-pupillaire.

Après avoir rempli le formulaire, les sujets furent confrontés à une première expression d'entraînement (la peur), afin de se familiariser à l'outil et au processus expérimental.

Pour cette expression, ils durent utiliser le prototype de tri en supprimant les expressions neutres, en supprimant les expressions exagérées ou non pertinentes, puis en triant les expressions restantes en fonction de leur niveau d'intensité.

Après avoir terminé leur entraînement, les sujets durent réitérer ces opérations sur nos 5 expressions. Celles-ci se succédaient deux fois : une fois pour le personnage masculin, puis une fois pour le personnage féminin.

À chaque fois, 17 personnages étaient positionnés sur le tapis. L'un d'entre eux correspondait à l'expression *Neutre* et les autres aux 16 niveaux d'intensité. Leur ordre de positionnement sur le tapis a été défini aléatoirement avant les expérimentations et fut le même pour tous les sujets¹³.

Enfin, les sujets furent libres de prendre le temps qu'ils souhaitaient pour trier les expressions.

4.3. Résultats de la définition des niveaux d'intensité

4.3.1. Méthodologie pour la définition des niveaux d'intensité

À partir de l'expression établie sur cette échelle composée de 16 niveaux d'intensités, nous souhaitons identifier 4 niveaux d'intensité représentatifs. Nous voulons qu'ils correspondent le plus fidèlement possible aux changements d'intensité perçus par la majorité des sujets lors du tri des expressions.

Nous proposons de représenter le résultat produit par un sujet λ , comme une liste ordonnée T_λ composée d'expressions ou d'ensembles d'expressions.

Nous identifions une expression par la valeur de son intensité. Par exemple, l'expression *Neutre* sera identifiée par la valeur 0, le premier niveau d'intensité par la valeur 1 et l'intensité maximale par la valeur 16.

Nous structurons la liste de tri T d'un sujet λ , en partant de la liste ordonnée des intensités qu'il a produit via le prototype.

Pour chaque expression rejetée par le sujet car perçue comme trop neutre, nous plaçons un ensemble d'expressions neutres (E_N) en début de liste. Nous incluons également l'expression neutre (d'intensité 0) dans cet ensemble, en remplaçant la valeur par E_N dans la liste de tri si l'expression *Neutre* n'a pas été éliminée.

Pour chaque expression rejetée par le sujet car perçue comme exagérée ou non pertinente, nous plaçons ensuite un ensemble d'expressions (E_E) en fin de liste.

Prenons ainsi l'exemple d'un sujet λ ayant perçu les expressions d'intensité 0, 1 et 3 comme neutres, puis les expressions d'intensité 15 et 16 comme exagérées ou non pertinentes. Imaginons que ce sujet ait correctement trié les expressions, à l'exception des expressions d'intensité 7 et 8 qu'il a inversé. Nous représentons le résultat obtenu par notre sujet λ sous la forme :

$$T_\lambda = (E_N, E_N, E_N, 2, 4, 5, 6, 8, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, E_E, E_E) \\ | \quad E_N = \{0, 1, 3\}, \quad E_E = \{15, 16\}$$

Afin de traiter les résultats obtenus, nous proposons de comparer les listes produites par les sujets, à une liste de référence (O) correspondant à l'ordre correct des expressions, i.e. d'intensités croissantes :

$$O = (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16)$$

Nous cherchons à établir quelles sont les positions optimales de nos 4 niveaux d'intensité sur cette liste O : i_1, i_2, i_3, i_4 .

13. L'ordre de positionnement utilisé est renseigné en Annexe 41

Nous proposons de définir ces positions comme optimales, lorsqu'elles correspondent à la position d'équilibre d'un changement d'intensité perçue par les sujets sur leurs listes de tri (T).

Pour ce faire, nous proposons de procéder en trois étapes successives :

1. Identifier le début de la perception, en définissant la position i_1 du premier niveau d'intensité . Elle correspond à la position d'équilibre à partir de laquelle un maximum de sujets perçoit l'expression.
2. Identifier la fin de la perception, en définissant la position i_4 du dernier niveau d'intensité. Elle correspond à la position d'équilibre à partir de laquelle un maximum de sujets perçoit l'expression comme exagérée.
3. Identifier des intensités intermédiaires, en définissant les positions i_2 et i_3 de niveaux intermédiaires. Elles correspondent aux positions d'équilibre à partir desquelles un changement d'intensité est perçu par un maximum de sujets.

Un exemple illustrant l'ensemble de la méthodologie proposée et les calculs effectués, peut être consulté en Annexe 42.

4.3.1.1. Calcul de i_1 , la position du premier niveau

Nous proposons d'identifier la position optimale de i_1 , lorsqu'un maximum de sujets a positionné l'expression neutre E_N avant cette position et un maximum d'expressions non-neutres après cette position.

Sur les n_e expressions présentées au sujet, nous calculons un score pour chaque position potentielle $i \in [0; n_e - 4]$.

Pour chaque position i , nous calculons un score de début de perception Sd , pour chaque liste de tri (T) de nos sujets. Le calcul de ce score consiste à compter le nombre d'ensemble d'expressions neutres E_N positionnés avant le rang i , ainsi que le nombre d'expressions non neutres positionnées après ce même rang i .

Pour une position i donnée, le score de début de perception Sd d'un sujet λ , est calculé selon l'Algorithme 1.

Algorithme 1 : Calcul du score de début de perception Sd

```

 $Sd_\lambda \leftarrow 0$  ;
pour tous les  $j < i$  faire
    | si  $T_\lambda(j) = E_N$  alors
    | |  $Sd_\lambda \leftarrow Sd_\lambda + 1$  ;
    | fin
fin
pour tous les  $j \geq i$  faire
    | si  $T_\lambda(j) \neq E_N$  alors
    | |  $Sd_\lambda \leftarrow Sd_\lambda + 1$  ;
    | fin
fin
retourner  $Sd_\lambda$  ;

```

Le score de début de perception Sd pour une position i donnée, est calculé en additionnant le score de chacun de nos n_s sujets :

$$Sd(i) = \sum_{j=1}^{n_s} Sd_j(i)$$

Après avoir calculé les scores pour chaque position potentielle i , nous déterminons donc la valeur i_1 de notre premier niveau d'intensité, à partir du rang sur O du score maximum calculé :

$$i_1 = O(i_{max}) \quad | \quad i_{max} = \arg \max_{i \in [0; n_e - 4]} Sd(i)$$

4.3.1.2. Calcul de i_4 , la position du dernier niveau

Nous proposons d'identifier la position optimale de i_4 , lorsqu'un maximum de sujets a positionné l'expression exagérée E_E après cette position et un maximum d'expressions non-exagérées avant cette position.

Sur les n_e expressions, nous calculons un score de fin de perception Sf pour chacune de ses positions $i \in [3; n_e]$.

Pour une position i , le score de fin de perception Sf d'un sujet λ est donc calculé selon l'Algorithme 2.

Algorithme 2 : Calcul du score de fin de perception Sf

```

 $Sf_\lambda \leftarrow 0$  ;
pour tous les  $j \leq i$  faire
    | si  $T_\lambda(j) \neq E_E$  alors
    | |  $Sf_\lambda \leftarrow Sf_\lambda + 1$  ;
    | fin
fin
pour tous les  $j > i$  faire
    | si  $T_\lambda(j) = E_E$  alors
    | |  $Sf_\lambda \leftarrow Sf_\lambda + 1$  ;
    | fin
fin
retourner  $Sf_\lambda$ ;
```

Le score de fin de perception Sf pour une position i donnée est calculé en additionnant le score des n_s sujets :

$$Sf(i) = \sum_{j=1}^{n_s} Sf_j(i)$$

Nous déterminons donc la valeur x_4 de notre dernier niveau d'intensité, à partir du rang du score maximum calculé :

$$x_4 = O(i_4) \quad | \quad i_4 = \arg \max_{i \in [3; n_e]} Sf(i)$$

4.3.1.3. Calcul de i_2 et i_3 , les positions des niveaux intermédiaires

Nous souhaitons trouver les positions d'équilibre, à partir desquelles un changement d'intensité est perçu par un maximum de sujets.

Nous proposons d'identifier les positions optimales de i_2 et i_3 , lorsqu'un maximum de sujets a positionné les mêmes expressions que la liste de référence O , entre les positions i_1 , i_2 , i_3 et i_4 .

Pour toutes les positions potentielles de i_2 et i_3 , nous cherchons à déterminer les valeurs $i_2 \in [i_1 + 1; i_4 - 1[$ et $i_3 \in [i_1 + 2; i_4[$, correspondant aux positions les plus représentatives.

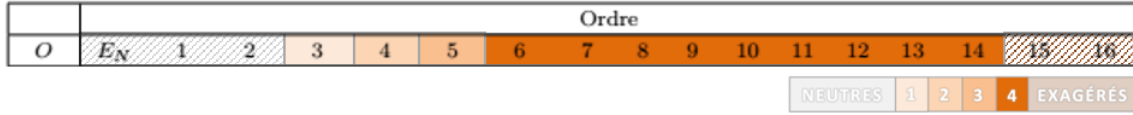


FIGURE 5.13: Exemple de positions intermédiaires déséquilibrées, pourtant retenues comme optimales, lorsque la taille des segments n'est pas prise en compte ($i_1 = 3$, $i_2 = 4$, $i_3 = 5$, $i_4 = 14$).

Pour chaque position potentielle de i_2 (k) et chaque position potentielle de i_3 (l), nous calculons à nouveau un score de positionnement Sm .

Nous comparons les listes de tri (T) des sujets, avec la liste de référence ordonnée O .

Nous calculons un score de correspondance des expressions positionnées sur les segments $[i_1; k[$, $[k; l[$ et $[l; i_4[$, en fonction de la taille de chacun de ces segments. Prendre en compte la taille des segments permet de tendre vers des positions homogènes de i_2 et i_3 . Dans le cas contraire, les résultats tendraient vers trop de configurations déséquilibrées, avec un segment de taille maximale et deux segments de taille minimale (Figure 5.13).

La correspondance est donc mesurée selon les correspondances entre l'ensemble des listes T produites par les sujets et la liste de référence ordonnée O .

Pour un couple (k, l) de positions potentielles de nos niveaux intermédiaires, le score de positionnement intermédiaire Sm d'un sujet λ est donc calculé selon l'Algorithme 3.

Algorithme 3 : Calcul du score de positionnement intermédiaire Sm

```

 $Sm_\lambda \leftarrow 0$  ;
 $s \leftarrow 0$ ;
pour tous les  $j \in [i_1; k[$  faire
    | si  $O(j) \in T_\lambda([i_1; k[)$  alors
    | |  $s \leftarrow s + 1$  ;
    | fin
fin
 $Sm_\lambda \leftarrow Sm_\lambda + s / (k - i_1)$ ;
 $s \leftarrow 0$ ;
pour tous les  $j \in [k; l[$  faire
    | si  $O(j) \in T_\lambda([k; l[)$  alors
    | |  $s \leftarrow s + 1$  ;
    | fin
fin
 $Sm_\lambda \leftarrow Sm_\lambda + s / (l - k)$ ;
 $s \leftarrow 0$ ;
pour tous les  $j \in [l; i_4[$  faire
    | si  $O(j) \in T_\lambda([l; i_4[)$  alors
    | |  $s \leftarrow s + 1$  ;
    | fin
fin
 $Sm_\lambda \leftarrow Sm_\lambda + s / (i_4 - l)$ ;
retourner  $Sm_\lambda$ ;

```

Le score de positionnement intermédiaire Sm pour un couple de positions potentielles (k, l) est calculé en additionnant le score des n_s sujets :

$$Sm(k, l) = \sum_{j=1}^{n_s} Sm_j(k, l)$$

Expression	Personnage	x_1	x_2	x_3	x_4	Intensités																
						0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Content(e)	Aitor	5	10	12	15	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Mari	6	8	12	14	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Mécontent(e)	Aitor	5	6	11	15	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Mari	6	11	12	15	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
En colère	Aitor	6	9	13	15	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Mari	7	11	13	14	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Surpris(e)	Aitor	4	5	9	15	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Mari	5	10	11	14	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Sceptique	Aitor	6	9	14	16	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Mari	7	9	12	15	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

FIGURE 5.14: Résultats obtenus pour la définition des niveaux d'intensité



FIGURE 5.15: Exemple de comparaison pour l'expression *En colère*, entre les niveaux dessinés et ceux établis grâce au prototype de tri

Nous déterminons les valeurs x_2 et x_3 de nos niveaux d'intensité intermédiaires, à partir des rangs k et l du score maximum calculé :

$$x_2 = O(i_2), x_3 = O(i_3) \mid (i_2, i_3) = \underset{k \in [i_1+1; i_4-1], l \in [i_1+2; i_4]}{\arg \max} Sm(k, l)$$

4.3.2. Résultats de la définition des niveaux d'intensité

La Figure 5.14 montre les résultats obtenus pour chaque expression de chacun des personnages.

On peut noter que toutes les expressions montrent un début de la perception après le premier niveau dessiné (4), à l'exception de l'expression *Surpris(e)* d'Aitor. Pour celle-ci, le début de la perception correspond à ce premier niveau. De ce fait, aucune expression ne présente un début de la perception inférieur au premier niveau dessiné.

Toutes les expressions présentent aussi une fin de perception antérieure au dernier niveau dessiné (16), hormis pour l'expression *Sceptique* d'Aitor.

Enfin, seule l'expression *Content(e)* de Mari montre une perception des niveaux correspondant à ceux dessinés par les sujets.

Nous avons donc fixé les niveaux d'intensité de nos expressions dessinées à partir de ces valeurs. La Figure 5.15 montre par exemple les différences apportées par ces nouveaux niveaux d'intensité pour l'expression *En colère*¹⁴.

4.4. Discussions sur la définition des niveaux d'intensité

Les résultats obtenus nous ont permis de revoir quasiment tous les niveaux d'intensité afin qu'ils soient plus pertinents.

Ils ont notamment permis d'identifier un début de perception trop faible des premiers niveaux dessinés, ainsi que des expressions trop exagérées (ou non pertinentes) pour le dernier niveau dessiné.

Les niveaux intermédiaires ont également été repositionnés pour la plupart des expressions.

Nous identifions cependant certaines limites à ces résultats.

Afin de ne pas surcharger d'avantage les sujets, nous n'avons pas ajouté de niveaux d'intensité après le dernier niveau dessiné (16). Pour l'expression *Sceptique* d'Aitor, la fin de la perception pertinente retenue correspond au dernier niveau dessiné. Par conséquent, rien ne garantit que ce dernier niveau ne soit plus pertinent avec des valeurs de déformation supérieures. Pour vérifier cela, il serait intéressant de reproduire l'expérimentation en définissant des expressions supplémentaires, placées après le dernier niveau dessiné.

De plus, nous avons demandé aux sujets de supprimer les expressions exagérées, en même temps que les expressions perçues comme non pertinentes (i.e. ne correspondant pas à l'émotion concernée). Il est par conséquent possible que certaines expressions aient été placées à la fin de la perception, sans qu'il soit pertinent qu'elles y figurent. Dans l'idéal, il serait donc nécessaire de différencier la suppression des expressions exagérées et non pertinentes, en deux étapes distinctes.

Ces résultats nous ont permis de redéfinir plus pertinemment les 4 niveaux d'intensité de chaque expression.

Nous avons obtenu des expressions faciales émotionnelles et des niveaux d'intensité correspondant à la perception de notre population de sujets.

Dans la sous-section suivante, nous cherchons donc à évaluer ces expressions. Pour analyser leur pertinence, nous les comparons aux expressions relevées dans la littérature, ainsi qu'à celles proposées par l'outil CC3.

5. Expérimentations : pré-sélection des expressions

Vu le nombre de façons différentes de dessiner présentes dans la littérature ou proposées par l'outil, nous avons souhaité pré-sélectionner des expressions représentatives afin de pouvoir les confronter à celles que nous avons dessinées.

Comme nous l'avons en effet évoqué, l'outil CC3 propose un nombre important (48) d'expressions faciales émotionnelles différentes pouvant correspondre à nos expressions : *Content(e)*, *Mécontent(e)*, *En colère* et *Surprise*. Nous avons également répertorié 13 compositions variées de ces expressions dans la littérature¹⁵.

Afin de ne pas surcharger d'avantage les sujets, nous avons souhaité réduire le nombre d'expressions à évaluer. Pour chacune de nos expressions, nous avons donc voulu extraire une manière de dessiner issue de la littérature et une autre proposée par l'outil.

5.1. Sujets "évaluateurs"

Toujours en collaboration avec Capgemini, nous avons appliqué ce processus expérimental sur une population de sujets "évaluateurs" issus de leurs effectifs.

Afin de limiter les biais, nous avons fait en sorte que cette population ne comprenne pas de sujets de la population de "dessinateurs", i.e. ayant permis de dessiner les expressions et d'en fixer les niveaux d'intensité. Nous avons donc à nouveau sollicité les sujets ayant participé à l'étude préliminaire.

14. L'ensemble des valeurs des blendshapes utilisés sont accessibles en Annexe 43)

15. Voir Table 5.1, p.172

TABLE 5.2: Compositions issues de la littérature et proposées aux sujets pour la pré-sélection

Expression		Compositions	AUs
Content(e)	1	Neutre	\emptyset
	2	Complète (C)	1, 6B, 7, 12E, 14, 25B
	3	Friesen et al. [59]	1, 6B, 12E, 14
	4	Parke et Waters [60]	1, 6B, 12E, 14
	5	Tinwell et al. [58]	1, 6B, 7, 12E
	6	Amini et lisetti [57]	6B, 12E, 25B
Mécontent(e)	1	Neutre	\emptyset
	2	Friesen et al. [59], Amini et lisetti [57]	1E, 4C, 15E
	3	Parke et Waters [60]	1E, 4C, 15E, 23
	4	Tinwell et al. [58]	1E, 4C, 15E, 23, 38
En colère	1	Neutre	\emptyset
	2	Complète (C)	2, 4E, 5B, 7B, 9, 10, 17, 20, 23A, 24B, 26
	3	Friesen et al. [59]	4E, 5B, 7B, 23A
	4	Parke et Waters [60]	2, 4E, 7B, 9, 10, 20, 26
	5	Tinwell et al. [58]	4E, 7B, 17, 24B
	6	Amini et lisetti [57]	4E, 5B, 7B, 23A, 24B
Surpris(e)	1	Neutre	\emptyset
	2	Friesen et al. [59], Tinwell et al. [58], Amini et lisetti [57]	1E, 2E, 5B, 26E
	3	Parke et Waters [60]	1E, 2E, 5B, 15, 16, 20, 26E

Nous avons réalisé cette évaluation sur une population de 50 sujets, composée à 64% et 36% de femmes, d'âge moyen 37 ans (± 11).

5.2. Processus expérimental pour la pré-sélection des expressions

Nous avons sollicité une première fois nos sujets "évaluateurs", afin d'établir quelles expressions de l'outil et de la littérature étaient les plus représentatives.

Pour ce faire, nous avons utilisé le prototype de tri précédemment présenté.

Pour chacune de nos 4 expressions, nous avons positionné sur le même tapis, des personnages correspondant aux différentes manières de dessiner proposées par l'outil CC3. Nous y avons également ajouté un personnage avec l'expression *Neutre*.

Nous en avons fait de même pour les manières de dessiner les expressions relevées dans la littérature. Pour les expressions *Content(e)* et *En colère* nous n'avons pas trouvé d'auteurs utilisant toutes les AUs. Nous avons donc ajouté une expression utilisant toutes les AUs utilisées par les différents auteurs. Nous appelons ces expressions "complètes" C.

La Table 5.2 montre ainsi les différentes compositions issues de la littérature qui ont été proposées aux sujets.

Toutes ces expressions furent dessinées aux intensités maximales¹⁶ définies dans la littérature¹⁷ ou proposées par l'outil¹⁸.

Les sujets durent donc à nouveau procéder en 3 étapes : supprimer les expressions perçues comme neutres, puis en faire de même pour celles paraissant exagérées (ou non pertinentes), avant de trier les expressions restantes en fonction de leur expressivité perçue.

L'ordre des personnages était à nouveau aléatoire et le même pour tous les sujets¹⁹.

Avant de commencer l'expérimentation, les sujets furent sensibilisés à l'utilisation du prototype. Il leur était notamment précisé qu'ils étaient libres de supprimer autant d'expressions qu'ils le souhaitaient, même s'il n'en restait plus aucun pour l'étape de tri.

16. Les correspondances et les intensités maximales établies pour chaque AU sont toutes spécifiées en Annexe 37

17. Les dessins des expressions établis selon les propositions présentes dans la littérature, sont accessible en Annexe 44

18. Les dessins des expressions proposés par l'outil ont été présentés en Figure 5.1 (p.165)

19. Les ordres de positionnement utilisés sont disponibles en Annexe 41

Comme lors des précédentes expérimentations, ils furent équipés d'un visiocasque HTC Vive²⁰, réglé sur leur écart inter-pupillaire.

Enfin, les sujets furent familiarisés au principe du prototype, en triant une expressions d'entraînement (la peur) au début de l'expérimentation.

5.3. Résultats de la pré-sélection des expressions

5.3.1. Méthodologie pour la pré-sélection des expressions

À nouveaux, nous proposons de représenter les résultats des tris effectués par les sujets comme un triptyque composé :

- d'un ensemble E_N d'expressions perçues comme neutres,
- d'un ensemble E_E d'expressions perçues comme exagérées ou non pertinentes,
- d'une liste ordonnée T , contenant les expressions triées par ordre croissant d'expressivité.

Afin de pré-sélectionner une expression parmi celles issues de la littérature, ainsi qu'une autre parmi celles proposées par l'outil, nous proposons de calculer un score de représentativité pour chacune d'entre elle.

Nous calculons ce score S en comparant deux à deux les différentes expressions, pour chacun de nos n_s sujets.

Pour chaque couple d'expressions (x, y) de notre ensemble d'expressions (E), le score de l'expression x pour un sujet λ vaudra :

- 0 si x et y font toutes les deux partie des expressions neutres (E_N), exagérées ou non pertinentes (E_E);
- 0 si x et y occupent la même position dans la liste de tri T (i.e. si $i = j$);
- 1 si x figure dans la liste de tri T , mais pas y ;
- 1 si x est positionnée après y dans la liste de tri T ;
- -1 si x ne figure pas dans la liste de tri T , alors que y oui;
- -1 si x est positionnée avant y dans la liste de tri T .

Soient i_x et i_y les rangs des expressions x et y dans la liste de tri T . Nous calculons le score de représentativité S de l'expression x , en appliquant l'Algorithme 4.

Algorithme 4 : Calcul du score de représentativité S d'une expression x

```

 $S(x) \leftarrow 0$  ;
pour tous les  $\lambda \in [1; n_s]$  faire
     $S_\lambda(x) \leftarrow 0$  ;
    pour tous les  $y \in E$  faire
        si  $i_x > i_y \parallel (x \in T_\lambda \ \& \ y \notin T_\lambda)$  alors
             $S_\lambda(x) \leftarrow S_\lambda(x) + 1$ 
        fin
        si  $i_x < i_y \parallel (x \notin T_\lambda \ \& \ y \in T_\lambda)$  alors
             $S_\lambda(x) \leftarrow S_\lambda(x) - 1$ 
        fin
    fin
     $S(x) \leftarrow S_\lambda(x)$ 
fin
retourner  $S(x)$ ;

```

20. Visiocasque agrémenté d'un *Deluxe Audio Strap*, voir Figure 4.33 (p.131)

TABLE 5.3: Scores de représentativité (S) obtenus pour la pré-sélection des expressions issues de la littérature

Expression	Personnage	S					
		0	[60]	[59]	[57]	[58]	C
Content(e)	Aitor	112	180	111	128	131	227
	Mari	62	175	69	115	92	189
Mécontent(e)	Aitor	11	129	90		76	
	Mari	45	105	145		96	
En colère	Aitor	17	173	96	128	24	96
	Mari	59	170	132	140	64	118
Surpris(e)	Aitor	54	66	77			
	Mari	57	75	96			

0 : expression neutre
 [60] : Parke et Waters
 [58] : Tinwell et al.
 [59] : Friesen et al.
 [57] : Amini et Lisetti
 C : expression complète, utilisant toutes les AU

TABLE 5.4: Scores de représentativité (S) obtenus pour la pré-sélection des expressions proposées par l'outil

Expression	Personnage	S												
Content(e)		0	<i>Happy_</i>											
			<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>
	Aitor	38	251	123	135	149	172	222	298	100	150	115	67	190
Mari	32	187	194	96	138	135	243	309	149	92	66	93	227	
Mécontent(e)		0	<i>Sad_</i>											
			<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>
	Aitor	73	85	77	216	196	150	198	178	150	292	216	161	137
Mari	114	114	114	207	237	163	232	195	209	267	250	204	140	
En colère		0	<i>Angry_</i>											
			<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>
	Aitor	129	143	178	250	138	142	144	134	301	183	261	296	338
Mari	108	125	154	244	163	124	133	139	306	201	231	294	291	
Surpris(e)		0	<i>Surprise_</i>											
			<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>
	Aitor	69	74	86	208	163	96	181	200	145	342	232	157	151
Mari	143	142	159	269	163	176	182	224	202	372	281	192	249	

0 : expression neutre

Pour celles issues de la littérature, puis pour celles proposées par l'outil, nous sélectionnons ainsi l'expression la plus représentative, i.e. celle qui obtiendra le meilleur score S .

5.3.2. Expressions pré-sélectionnées

Les scores obtenus à l'issue de la pré-sélection des expressions de la littérature sont présentés en Table 5.3.

Pour les expressions *Content(e)* et *Surpris(e)* des deux personnages, le meilleur score a été obtenu par les expressions utilisant toutes les AUs proposées dans la littérature.

Pour l'expression *En colère*, c'est en revanche la proposition de Parke et Waters [60] qui obtient le meilleur score.



FIGURE 5.16: Pour *En colère*, différences des expressions jugées plus représentative selon le personnage

Cette expression diffère des autres par l'utilisation de nombreuses AUs que ne proposent pas les autres auteurs :

- AU 2 : remontée de la partie externe des sourcils
- AU 9 : plissement de la peau du nez vers le haut
- AU 10 : remontée de la partie supérieure de la lèvre
- AU 20 : étirement externe des lèvres
- AU 26 : ouverture de la mâchoire

Enfin, notons qu'à l'exception de *Mécontent(e)*, les expressions obtenant le meilleur score sont les mêmes pour Aitor et Mari.

Pour l'expression *Mécontent(e)* de Mari, la composition proposée par Friesen et al. [59] pour la tristesse (reprise par Amini et Lisetti [57]) a en effet obtenu un meilleur score, alors que celle proposée par Parke et Waters [60] a été jugée plus représentative pour Aitor.

Parke et Waters proposent d'ajouter l'AU 23 (tension refermante des lèvres) aux AUs proposées par Friesen et al. Ils ne proposent en revanche pas d'utiliser l'AU 38 (dilatation des nasaux), pourtant proposée par Tinwell et al. [58] (composition qui n'a pas obtenu le meilleur score, tant pour Mari que pour Aitor).

Les scores des expressions proposées par l'outil permettent de dégager les expressions les plus représentatives (Table 5.4).

À l'exception de l'expression *En colère*, on constate que les meilleurs scores sont obtenus par les mêmes expressions pour Aitor et Mari. Pour "*En colère*", les différences semblent concerner les déformations des zones correspondant à la bouche et aux sourcils des personnages (Figure 5.16).

Ces résultats nous permettent donc de sélectionner pour chaque expression, une manière de dessiner relevée dans la littérature et une autre proposée par l'outil CC3 (Figure 5.17).

5.4. Discussions sur la pré-sélection des expressions

À partir de la perception des sujets, les résultats nous ont permis de pré-sélectionner des expressions parmi celles proposées par l'outil, ainsi que dans la littérature.

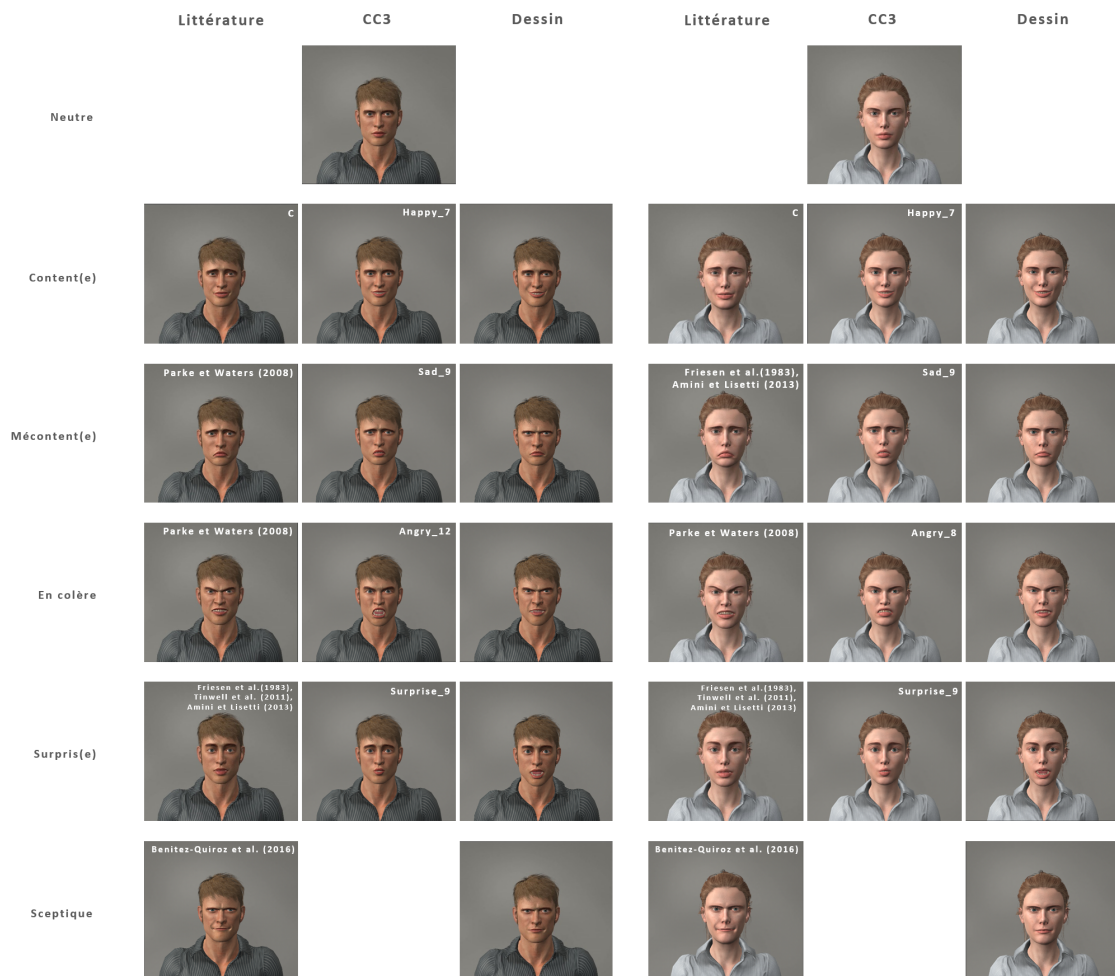


FIGURE 5.17: Dessins à intensités maximales, pour les différentes expressions évaluées

Nous identifions cependant une limite à ces résultats.

Comme nous l'avons précédemment rappelé, nous avons défini nous-même les correspondances entre les AUs FACS et les blendshapes de CC3²¹. Il est possible que ces correspondances ne soient pas optimales.

Dans la sous-section suivante, nous confrontons ces expressions à celles que nous avons précédemment dessinées. Nous cherchons ainsi à établir quelles sont les expressions les plus pertinentes, puis quelles sont les différences dans l'utilisation des AUs qu'elles soulignent.

6. Expérimentations : évaluation des expressions

Nous souhaitons évaluer la pertinence de nos expressions dessinées, en les confrontant à celles que nous avons pré-sélectionnées. En mélangeant toutes ces expressions puis en analysant leur perception pour une population de sujets, nous souhaitons ainsi établir lesquelles étaient les plus pertinentes.

6.1. Prototype d'évaluation

Nous avons conçu un prototype en Réalité Virtuelle.

Il consiste à faire défiler les différents personnages de manière aléatoire, avec diverses expressions faciales émotionnelles dessinées.

21. Pour rappel, les correspondances sont accessibles en Annexe 37

Un panneau de sélection est disposé devant les personnages. Les sujets devaient y indiquer l'émotion qu'ils percevaient. Pour cela, ils disposent d'un panneau de sélection, placé entre le personnage virtuel et eux. Celui-ci comporte 6 boutons, correspondant à chacune de nos expressions. Le nom de l'expression est indiqué par un label sur chacun d'entre eux.

Chaque choix est enregistré dans un fichier à l'issue de l'utilisation.

Nous avons relevé dans la littérature, qu'imposer un temps limite aux sujets pouvait être intéressant afin de capter la perception spontanée. Nous avons ainsi défini une limite de temps de 30 secondes pour sélectionner une émotion perçue. Si un utilisateur met trop de temps à répondre, un décompte s'affiche sur les 10 dernières secondes restantes. Un signal sonore accompagne également ce décompte final à chaque seconde écoulée.

6.2. Processus expérimental pour l'évaluation des expressions

Pour évaluer les expressions, nous avons dessiné 4 niveaux d'intensité pour chacune des expressions. Pour celles issues de la littérature et de l'outil, nous avons fixé ces niveaux de manière linéaire, entre l'expression neutre et l'expression d'intensité maximale.

Nous avons ensuite mélangé ces expressions à celles que nous avons précédemment dessiné, au sein du prototype d'évaluation.

À noter que pour l'expression *Sceptique*, aucune expression n'est proposée par l'outil. Dans la littérature, une seule manière de dessiner l'expression a été relevée.

Les sujets "évaluateurs" ont ainsi été sollicités une seconde fois, afin d'évaluer les expressions sur ce prototype.

Lors de leur passage, ils furent tout d'abord sensibilisés à ses fonctionnalités, et avisés qu'ils ne disposaient que de 30 secondes pour sélectionner une émotion perçue.

Comme lors des précédentes expérimentations, ils furent équipés d'un visiocasque HTC Vive, préalablement réglé sur leur écart inter-pupillaire.

Enfin, ils furent aussi familiarisés au principe du prototype en évaluant 4 expressions d'entraînement au début de l'expérimentation.

6.3. Résultats de l'évaluation des expressions

6.3.1. Méthodologie pour l'évaluation des expressions

Nous identifions deux caractéristiques propres à la perception d'une expression faciale émotionnelle : le fait qu'elle soit correctement identifiée et le fait que cette identification soit immédiate. Nous proposons donc deux caractéristiques permettant de qualifier la perception des expressions :

- la *correction* de la perception, i.e. lorsque l'émotion est perçue comme non-neutre et qu'elle n'est pas confondue avec une autre émotion.
- la *spontanéité* de la perception, i.e. lorsque la prise de décision est rapide, qu'elle ne laisse place qu'à peu d'hésitations.

Nous nous efforçons d'analyser ces deux critères lors de l'analyse des résultats. Nous proposons ainsi d'appliquer la méthodologie suivante :

1. Analyser la correction via le pourcentage d'erreurs d'identification.

Nous proposons d'analyser le pourcentage d'erreurs commises par les sujets lors de l'identification de l'émotion.

Lorsqu'un dessin semble être plus souvent identifié que les autres, nous proposons de vérifier si cette différence est significative en effectuant un test exact de Fisher [148].

2. Si les tests ne s'avèrent pas significatifs, analyser la *Spontanéité des Perceptions Correctes* (SPC).

Lorsqu'une manière de dessiner n'obtient pas des pourcentages d'erreur significativement inférieurs, nous proposons de sélectionner l'expression la plus représentative en mesurant la spontanéité des réponses correctes des sujets.

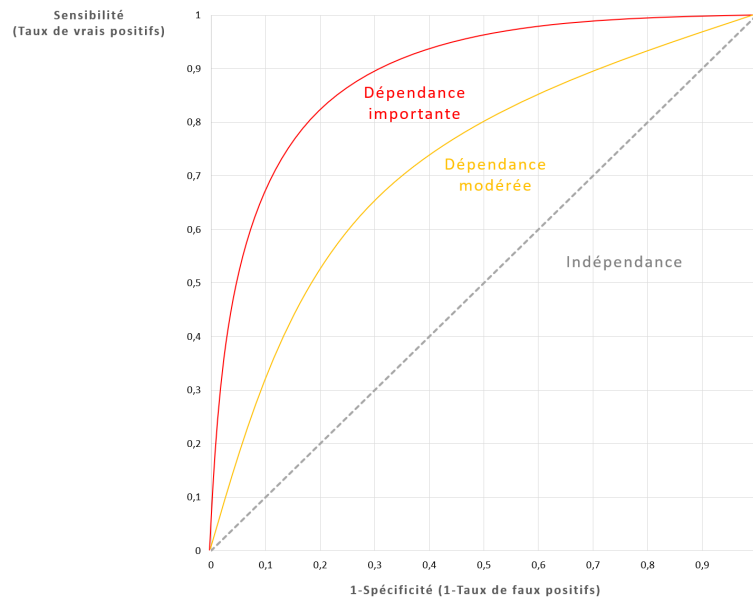


FIGURE 5.18: Exemple de courbes ROC

Pour cela, nous souhaitons d'abord établir s'il y a une dépendance entre les temps de réponse et les taux d'erreur. Nous souhaitons ainsi analyser la dépendance entre les variables *Temps de réponse* (variable quantitative continue) et *Erreur* (booléen, variable qualitative dichotomique). Nous proposons donc de le vérifier en utilisant une *courbe ROC*.

Une courbe ROC (*Receiver Operating Characteristic*) permet de mesurer la performance d'un classificateur binaire (e.g. variable *Erreur*) en fonction d'un seuil de discrimination (e.g. variable *Temps de réponse*).

Pour chaque seuil de discrimination, elle consiste à représenter son score de pertinence selon son taux de vrais positifs (ou Sensibilité, i.e. $!Erreur \ \& \ Temps \ de \ réponse \leq \ seuil$), en fonction de sa Spécificité (ou $(1 - \text{taux de faux positifs})$, e.g. $(1 - Erreur \ \& \ Temps \ de \ réponse < \ seuil)$).

En observant la courbe ROC, il est donc possible d'analyser la dépendance entre les deux variables (Figure 5.18).

Nous avons dessiné cette courbe à partir de toutes nos évaluations (Figure 5.19). Elle montre une dépendance modérée entre le fait de percevoir la bonne expression et celui de mettre peu de temps à réponse.

Du fait de cette dépendance modérée entre la perception de la bonne émotion et la prise de peu de temps à répondre, nous proposons d'évaluer la validité de nos expressions faciales émotionnelles en analysant la spontanéité des réponses justes.

Ainsi, nous formulons le postulat qu'une expression faciale émotionnelle est mieux perçue qu'une autre, si nous observons de manière plus marquée des réponses correctes prononcées rapidement.

Nous introduisons donc la Spontanéité des Réponses Correctes (SPC), comme la représentation du taux de réponses correctes ($!Erreur \ \& \ Temps \ de \ réponse \leq \ Temps$), en fonction des *Temps de réponse* relevés pour chaque évaluation (Figure 5.20).

6.3.2. Résultats : expression *Content(e)*

Pour Aitor et Mari, l'expression *Content(e)* qui obtient le taux d'erreur le plus faible est celle que nous avons dessiné à partir de la perception de notre population de "dessinateurs" (Figure 5.21).

Ces taux d'erreur se sont avérés significativement inférieurs (Table 5.5), nous permettant ainsi de retenir l'expression dessinée (Figure 5.22) comme la plus représentative.

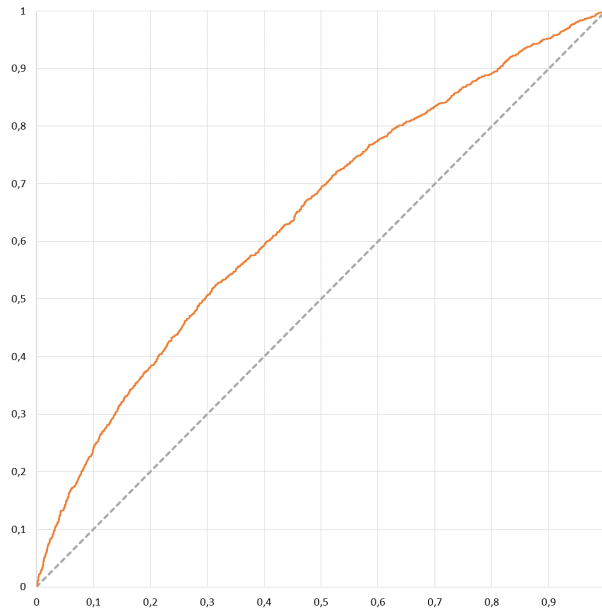


FIGURE 5.19: Courbe ROC des évaluations, toutes expressions confondues

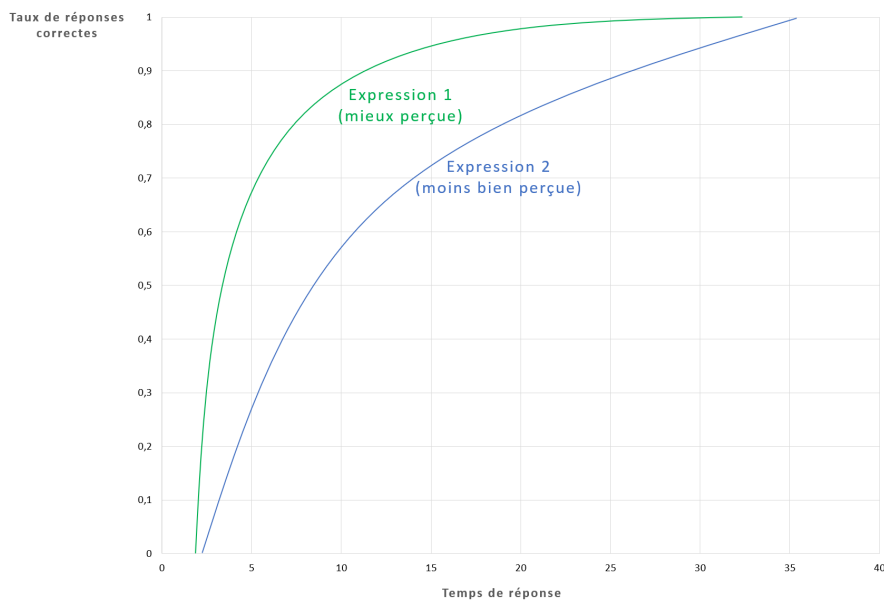


FIGURE 5.20: Exemple de courbes SPC (*Spontanéité des Perceptions Correctes*)

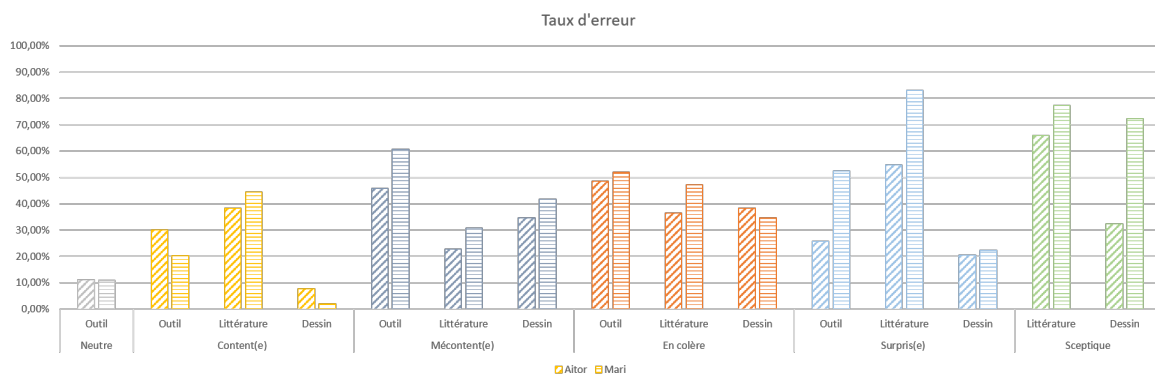


FIGURE 5.21: Taux d'erreurs pour les différentes expressions évaluées

TABLE 5.5: Résultats des tests statistiques (Fisher) concernant les taux d'erreur obtenus pour l'expression $Content(e)$

Personnage	Dessins testés		p	Différence ?
Aitor	Dessin	Outil (<i>Happy_7</i>)	$p < 0.01$	Significative
		Littérature (C)	$p < 0.01$	Significative
Mari	Dessin	Outil (<i>Happy_7</i>)	$p < 0.01$	Significative
		Littérature (C)	$p < 0.01$	Significative



FIGURE 5.22: Dessins retenus pour l'expression $Content(e)$

6.3.3. Résultats : expression $Mécontent(e)$

Pour l'expression $Mécontent(e)$, c'est le dessin issu de la littérature qui obtient les taux d'erreur les plus faibles (Figure 5.21). Pour rappel, il s'agit du dessin proposé par Parke et Waters [60] pour Aitor, ainsi que celui proposé par Friesen et al. [59] pour Mari.

Les taux d'erreur se sont avérés significativement inférieurs (Table 5.6), nous permettant de retenir les expressions de la littérature (Figure 5.23) comme les plus représentatives.

6.3.4. Résultats : expression $En\ colère$

Pour l'expression $En\ colère$ de Mari, le dessin conçu à partir de la perception des sujets "dessinateurs" a obtenu le taux d'erreur le plus faible (Figure 5.21). Pour Aitor, le taux d'erreur des expressions dessinées à partir de la littérature semble à peine inférieur à celui des expressions dessinées par les sujets.

Pour Mari, les expressions dessinées à partir de la perception des sujets ont montré des taux significativement plus faibles que les autres dessins (Table 5.6).

En revanche, les tests statistiques n'ont pas permis de différencier cette expression et celle issue de la littérature pour Aitor.

Nous avons donc souhaité analyser la SPC afin d'essayer de déterminer si l'un de ces deux dessins pouvait être jugé plus représentatif. Les résultats nous montrent une meilleure SPC pour le dessin issu de la littérature (Figure 5.24). Le taux de réponses correctes évolue en effet plus rapidement et nous obtenons une valeur τ nettement inférieure.

Ces résultats nous permettent de retenir l'expression issue de la littérature comme plus représentative pour Aitor (Figure 5.25). Pour Mari, nous retenons au contraire l'expression dessinée par nos sujets.

6.3.5. Résultats : expression $Surpris(e)$

Pour l'expression $Surpris(e)$, le dessin établi à partir de la perception de nos sujets semble avoir obtenu le plus faible taux d'erreurs pour les deux personnages (Figure 5.21).

Pour Mari, les tests statistiques ont montré que le taux d'erreurs des expressions dessinées par les sujets était significativement inférieurs à ceux des autres expressions (Table 5.8).

III. DESSIN ET ÉVALUATION D'EXPRESSIONS FACIALES ÉMOTIONNELLES EN RÉALITÉ VIRTUELLE

TABLE 5.6: Résultats des tests statistiques (Fisher) concernant les taux d'erreur obtenus pour l'expression *Mécontent(e)*

Personnage	Dessins testés	p	Différence ?
Aitor	Littérature (Parke et Waters [60])	Outil (<i>Sad_9</i>)	$p < 0.01$ Significative
		Dessin	$p = 0.012$ Significative
Mari	Littérature (Friesen et al. [59], Amini et Lisetti [57])	Outil (<i>Sad_9</i>)	$p < 0.01$ Significative
		Dessin	$p = 0.033$ Significative



FIGURE 5.23: Dessins retenus pour l'expression *Mécontent(e)*

TABLE 5.7: Résultats des tests statistiques (Fisher) concernant les taux d'erreur obtenus pour l'expression *En colère*

Personnage	Dessins testés	p	Différence ?
Aitor	Littérature (Parke et Waters [60])	Outil (<i>Angry_12</i>)	$p = 0.017$ Significative
		Dessin	$p > 0.05$ Non significative
Mari	Dessin	Outil (<i>Angry_8</i>)	$p < 0.01$ Significative
		Littérature (Parke et Waters [60])	$p = 0.017$ Significative

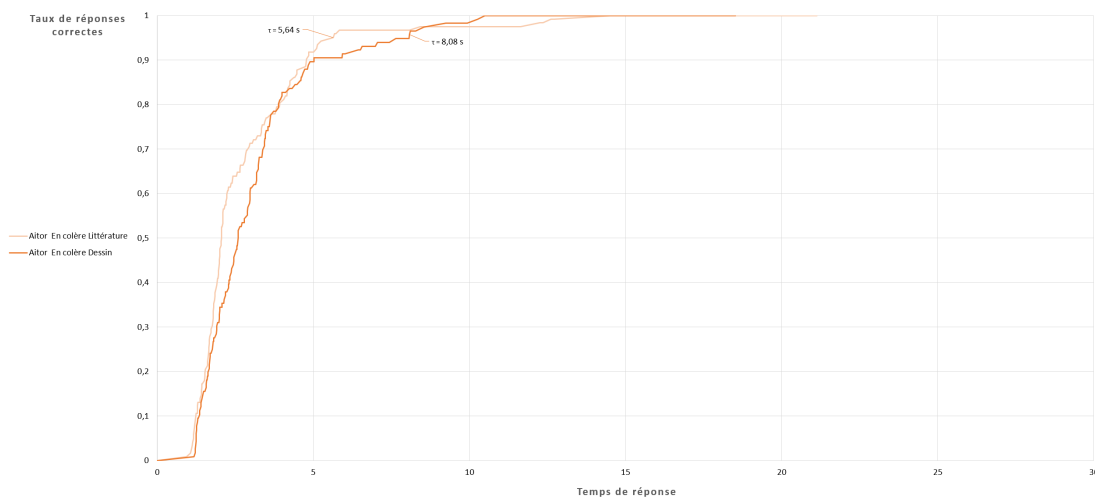


FIGURE 5.24: Spontanéité des Perceptions Correctes (SPC) pour l'expression *En colère* du personnage Aitor

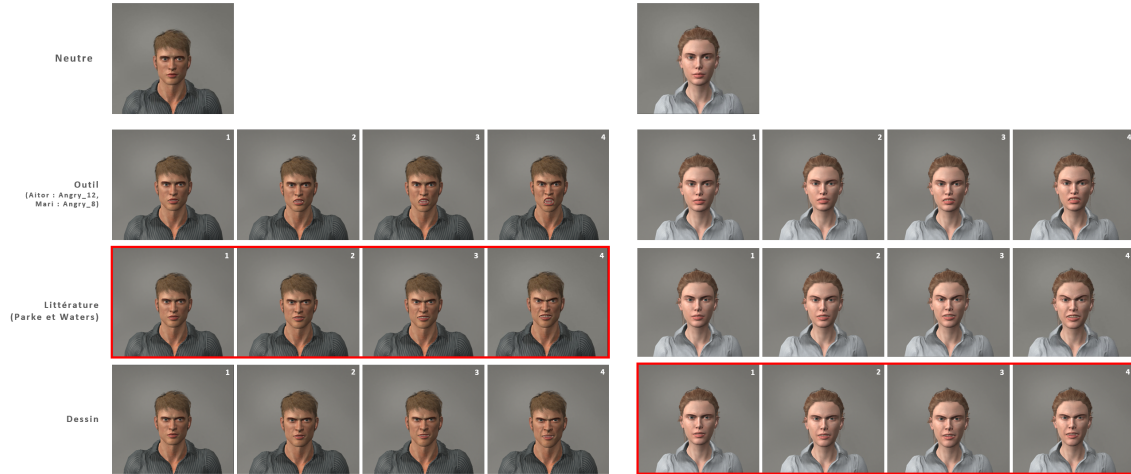


FIGURE 5.25: Dessins retenus pour l'expression *En colère*

TABLE 5.8: Résultats des tests statistiques (Fisher) concernant les taux d'erreur obtenus pour l'expression *Surpris(e)*

Personnage	Dessins testés		p	Différence ?
Aitor	Dessin	Outil (<i>Surprise_9</i>)	$p > 0.05$	Non significative
		Littérature [57, 58, 59]	$p < 0.01$	Significative
Mari	Dessin	Outil (<i>Surprise_9</i>)	$p < 0.01$	Significative
		Littérature [57, 58, 59]	$p < 0.01$	Significative

[57] : Amini et Lisetti

[58] : Tinwell et al.

[59] : Friesen et al.

Pour Aitor, la différence n'est pas suffisamment importante avec ceux de l'expression proposée par l'outil.

Nous avons donc analysé la SPC pour ces deux dessins sur Aitor. Les résultats montrent une SPC beaucoup trop similaire pour que nous puissions départager les deux expressions (Figure 5.26). Outre des valeurs de τ quasi-identique, les courbes obtenues évoluent de la même manière.

Avec ces résultats en l'état, nous retenons donc la possibilité d'utiliser les deux manières de représenter l'expression pour ce personnage (Figure 5.27).

6.3.6. Résultats : expression *Sceptique*

Pour l'expression *Sceptique*, c'est également le dessin obtenu à partir de la perception des sujets qui semble avoir obtenu le taux d'erreurs le plus faible (Figure 5.21).

Cette différence par rapport à l'expression issue de la littérature s'est montrée significative pour Aitor (Table 5.9). En revanche, les taux d'erreur ne sont pas significativement inférieurs pour Mari.

Nous avons donc souhaité analyser la SPC pour ces deux dessins sur Mari. Les résultats montrent une SPC légèrement meilleure pour l'expression dessinée à partir de la perception des sujets (Figure 5.28). Le taux de réponses correctes évolue plus rapidement pour l'expression dessinée et sa valeur τ est également légèrement supérieure.

Ces résultats nous amènent donc à retenir les expressions dessinées par les sujets comme plus représentatives que celle de la littérature (Figure 5.29).

6.4. Discussions sur l'évaluation des expressions

Les résultats nous permettent d'établir les dessins les plus représentatifs pour chacune de nos expressions.

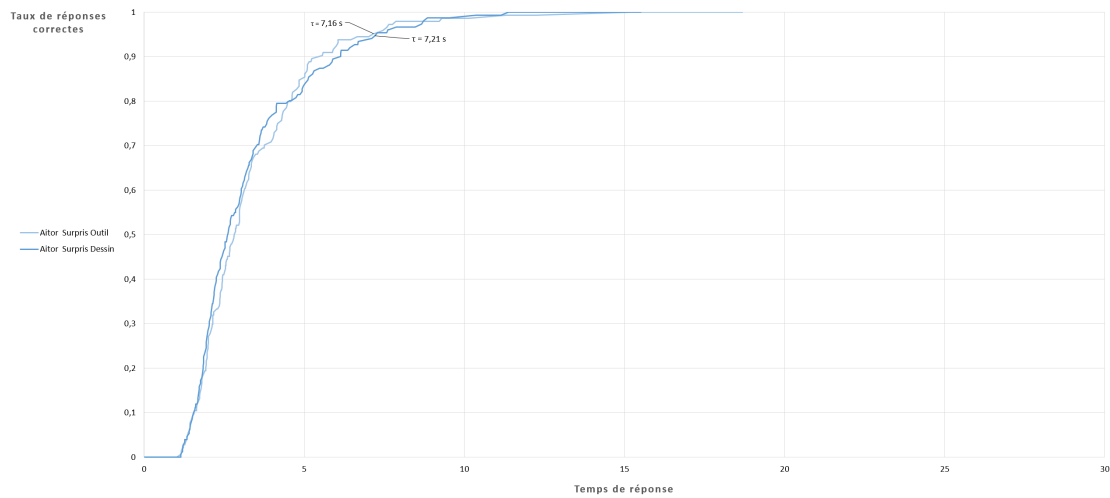


FIGURE 5.26: Spontanéité des Perceptions Correctes (SPC) pour l'expression *Surpris(e)* du personnage Aitor



FIGURE 5.27: Dessins retenus pour l'expression *Surpris(e)*

TABLE 5.9: Résultats des tests statistiques (Fisher) concernant les taux d'erreur obtenus pour l'expression *Sceptique*

Personnage	Dessins testés		p	Différence ?
Aitor	Dessin	Littérature (Benitez-Quiroz et al. [61])	$p < 0.01$	Significative
Mari	Dessin	Littérature (Benitez-Quiroz et al. [61])	$p > 0.05$	Non significative

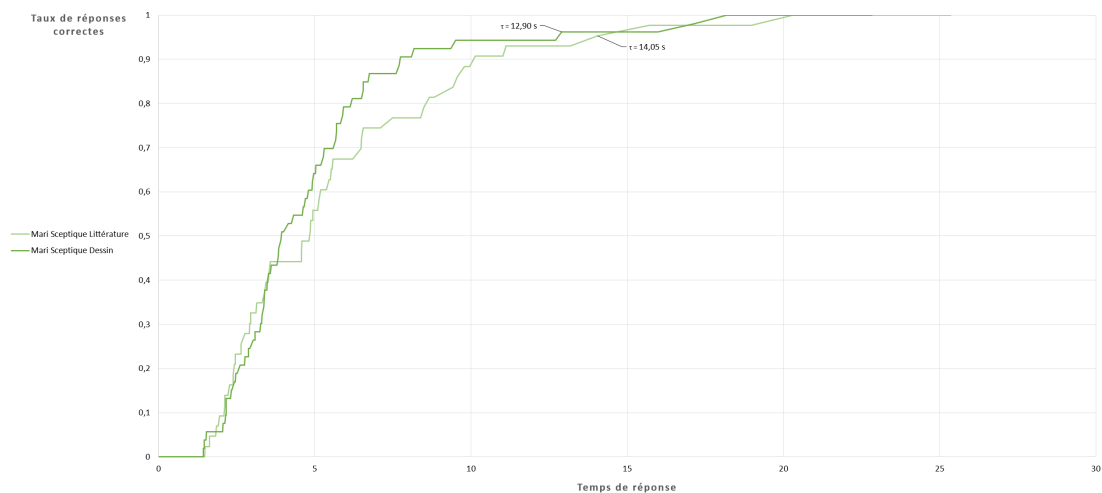


FIGURE 5.28: Spontanéité des Perceptions Correctes (SPC) pour l'expression *Sceptique* du personnage Mari



FIGURE 5.29: Dessins retenus pour l'expression *Sceptique*

Pour la plupart, le dessin notre population de sujets "dessinateurs" a été retenue. Ces résultats nous réconfortent ainsi dans l'idée que dessiner une expression faciale émotionnelle à partir de la perception d'une population peut être une méthode efficace.

Pour l'expression *Mécontent(e)*, ce sont en revanche les dessins issus de la littérature qui ont été perçus de manière plus représentative.

Nous avons relevé cette expression utilisée par les auteurs pour représenter la tristesse, en supposant des similitudes de son expression avec celle exprimant le mécontentement. Or, la tristesse ne faisait pas partie des émotions que les sujets pouvaient sélectionner.

Une des limites de ce résultat provient donc du fait que les sujets puissent avoir perçu de la tristesse, puis sélectionné le mécontentement par ce qu'ils en estimaient leur perception plus proche.

Des expérimentations supplémentaires, sur un prototype d'évaluation modifié répondrait peut-être à cette problématique. Il faudrait permettre aux sujets d'indiquer que l'émotion perçue ne correspond à aucune de celles proposées. Une autre possibilité consisterait à demander aux sujets d'exprimer oralement l'émotion face à l'expression, plutôt que de la sélectionner dans une liste.

Nous avons aussi relevé des différences en fonction du personnage.

Pour l'expression *En colère*, la méthode de dessin proposée par Parke et Waters [60] a par exemple obtenu de meilleurs résultats que celle dessinée par les sujets, alors que nous observons l'inverse pour le personnage féminin (Mari). Ces résultats viennent appuyer nos observations sur le fait que la pertinence d'un expression faciale émotionnelle puisse varier en fonction du personnage sur lequel elle est dessinée.

Des expérimentations supplémentaires, visant à établir quelles caractéristiques des différents modèles neutres amènent ces variations, seraient nécessaires afin de résoudre cette problématique. Tant que ce n'est pas le cas, nous recommandons donc d'effectuer des études telles que celle-ci, afin de déterminer quelle(s) expression(s) sont les plus pertinentes pour un modèle neutre de base donné.

Pour l'expression *Surpris(e)* du personnage Aitor, les résultats n'ont pas permis de départager l'expression proposée par l'outil de celle dessinée par les sujets. Des expérimentations supplémentaires, sur un échantillon plus important de sujets sont nécessaire si l'on souhaite ne retenir qu'une seule expression.

Ces résultats nous ont également permis d'identifier certaines différences dans la composition en AUs, entre les expressions retenus et celles rejetées. Cette analyse peut être consultée en Annexe 45. Enfin, il faut noter que nous avons également analysé les variations inter-sexes sur les résultats des évaluations²². Les résultats ne nous ont cependant pas permis d'établir de variations.

6.4.1. Limites des résultats

Nous identifions cependant certaines limites à ces résultats.

Comme nous venons de le voir, le fait d'avoir limité la liste de nos expressions perçues à nos 6 émotions peut avoir impacté nos résultats. Pour résoudre cette problématique, nous suggérons l'ajout de la possibilité d'indiquer que l'émotion perçue ne correspond à aucune des expressions proposées.

De plus, il peut être réducteur d'établir la pertinence d'une expression faciale émotionnelle seulement au travers de la reconnaissance de l'émotion du personnage virtuel.

Le fait que l'expression faciale puisse être perçue comme exagérée ou dérangeante devrait également être pris en compte. Nous ne l'avons que partiellement fait, lors de l'utilisation des prototypes de tri. Il serait intéressant d'ajouter la possibilité de signaler une expression comme exagérée et/ou dérangeante lors de la phase d'évaluation, afin de prendre en compte cette dimension.

La manière de composer les AUs et de définir leurs intensités avec l'outil CC3 est aussi à prendre en considération.

Nous avons dessiné les expressions à partir de notre proposition d'une correspondance entre les AUs FACS et les blendshapes de CC3. Comme nous l'avons précédemment mentionné, ces correspondances peuvent prêter à discussion et des travaux supplémentaires pour les confirmer et les affiner seraient nécessaires.

La manière de fixer les déformations maximales pour chaque AU peut également prêter à discussions. Lorsque nous n'avons pas trouvé d'intensité spécifiée pour une AU dans la littérature, nous lui avons attribué l'intensité maximale (E) par défaut. De plus, nous nous sommes basé sur les déformations maximales proposées par l'outil quitte à appliquer ensuite quelques ajustements²³.

L'analyse des différentes AUs composant les expressions retenues nous ont cependant permis d'apporter des pistes de réflexion pour améliorer ces correspondances et leurs intensités.

Une autre limite concerne la définition des niveaux d'intensité de nos expressions.

Pour l'expression dessinée par les sujets, nous avons établi les différences d'intensité de manière indépendante pour chaque AU, à partir des valeurs obtenues.

Ce ne fut pas le cas pour les expressions issues de la littérature et pour celles proposées par l'outil. Pour ces expressions, nous avons appliqué la même intensité aux différentes AUs, en proportion de leur intensité maximale.

Pour les expressions dessinées, nous avons défini les niveaux en utilisant le prototype de tri afin de déterminer le début, la fin et les différents paliers intermédiaires de la perception de l'expression.

Lors de travaux futurs, il serait donc intéressant de vérifier les résultats obtenus en effectuant la même démarche pour les expressions issues de la littérature et celles proposées par l'outil.

²². L'étude des variations inter-sexes est disponible en Annexe 35

²³. Nous avons par exemple du appliquer des ajustements pour l'AU 26, correspondant à l'ouverture de la mâchoire (voir paragraphe *Codage des AUs FACS avec les blendshapes de CC3*, p.176)

Les évaluations retenant majoritairement les expressions dessinées, obtenir des résultats différents permettrait ainsi de confirmer la pertinence de notre approche pour fixer des niveaux d'intensité pertinents.

IV Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons souhaité explorer la possibilité d'utiliser la Réalité Virtuelle afin de concevoir des expressions faciales émotionnelles représentatives à partir de leur perception. La finalité consistait notamment à définir les expressions faciales émotionnelles les plus pertinentes possibles pour l'Holodeck Safran.

Dans un premier temps, nous avons identifié les principales méthodes d'animation faciale. Nous avons notamment relevé l'utilisation des méthodes d'animation par blendshapes, dont nous nous sommes ensuite servi pour définir nos expressions.

Nous avons ensuite déterminé des problématiques inhérentes aux expressions faciales émotionnelles. Nous avons souligné l'importance de leur identification, ainsi que la nécessité de pertinence de leurs dessins et de leurs niveaux d'intensité. Enfin, nous avons identifié les problématiques liées aux outils d'animation et souligné l'intérêt d'une approche basée sur des évaluations subjectives.

Une étude préliminaire nous a permis de relever que les expressions faciales émotionnelles dessinées dans le cadre des travaux de l'Holodeck Safran, n'étaient pas correctement perçues.

Nous avons donc analysé la littérature afin de déterminer si des manières de définir des expressions faciales émotionnelles figuraient dans la littérature. Nous avons notamment retenu l'utilisation de FACS (*Facial Action Coding System*), permettant de décrire les expressions faciales émotionnelles en les décomposant selon les zones et les mouvements du visage (*AUs*). Nous avons ainsi été en mesure d'identifier dans la littérature une ou plusieurs manières de composer chacune des 5 expressions faciales émotionnelles de l'Holodeck Safran.

Cet état de l'art nous a également permis de souligner à nouveau l'intérêt de l'utilisation des évaluations subjectives afin d'évaluer des expressions. Il nous a aussi amené à identifier des méthodes et des précautions à prendre, de sorte à éviter certains biais lors de ce type d'évaluations.

Nous avons ensuite proposé une méthode afin de définir des expressions faciales émotionnelles pertinentes, en se basant sur la perception de populations de sujets.

Celle-ci utilise des prototypes que nous avons présenté. Ils permettant de dessiner, de trier ou d'évaluer des expressions faciales émotionnelles en utilisant une méthode d'animation par blendshapes, s'appuyant sur les AUs FACS.

Nous avons ensuite expérimenté cette méthode sur deux populations de sujets. Une première population a permis de dessiner des expressions faciales émotionnelles correspondant à sa perception majoritaire, puis de définir des niveaux d'intensité pertinents. La deuxième fut ensuite utilisée afin d'évaluer les expressions obtenues, en les confrontant aux expressions dessinées à partir de la littérature, ainsi qu'à celles proposées par l'outil d'animation (*Character Creator 3*).

Pour chacune d'entre-elles, nous avons proposé puis appliqué plusieurs méthodologies afin d'exploiter les résultats obtenus.

À quelques exceptions près, les résultats ont permis d'identifier les expressions dessinées comme plus pertinentes. Ils ont aussi soulevé l'intérêt (ou non) de l'utilisation de certaines AUs, pourtant définies dans la littérature, ou proposées par l'outil.

Si les résultats nous ont permis de déterminer une manière plus pertinente de dessiner les expressions, ils nous ont cependant montré des différences selon le personnage utilisé. De ce fait, il ne semble pas possible de généraliser et d'affirmer qu'une manière de dessiner une expression est plus pertinente que les autres pour n'importe quel personnage.

Pour ce faire, des études supplémentaires seraient nécessaires, afin d'analyser quelles caractéristiques des modèles 3D neutres influent sur la perception de l'expression.

Néanmoins, les différences constatées selon le personnage tendent à renforcer l'intérêt de l'utilisation d'une méthode basée sur des évaluations subjectives, telle que celle proposée.

Lors de nos travaux, nous avons souhaité établir la pertinence des expressions en Réalité Virtuelle, en utilisant un visiocasque. Par ce moyen, nous souhaitions placer les sujets dans la même position que les utilisateurs finaux de l'Holodeck Safran.

Cependant, nous avons vu précédemment qu'il pouvait être nécessaire d'utiliser une version projetée pour pallier à certaines problématiques suscitées par l'utilisation du visiocasque. Nous avons également souligné que la perception des expressions faciales émotionnelles pouvait être impactée par l'utilisation d'un support projeté. Des expérimentations supplémentaires seraient donc nécessaires, afin d'évaluer si nous obtenons les mêmes résultats lorsque nous utilisons une autre interface visuelle que le visiocasque.

Une des principales limites de nos travaux viennent du fait que nous avons cherché à étudier la perception d'expressions faciales émotionnelles statiques.

Plusieurs auteurs soulignent que l'activité neuronale diffère lorsque nous sommes confrontés à des expressions faciales dynamiques [182, 210, 211, 212]. Elle serait notamment plus importante.

Comme la méthode que nous proposons ne se base qu'uniquement sur des expressions statiques, il serait judicieux d'en analyser la pertinence lorsqu'elles s'animent sur le visage des personnages virtuels. Des études supplémentaires, animant les expressions selon les différents niveaux que nous avons retenu, seraient donc nécessaires.

Dans ce chapitre, nous avons vu que la Réalité Virtuelle pouvait être utilisée afin de concevoir l'environnement virtuel avec pertinence.

En récoltant des données issues de la perception des utilisateurs, il est possible de modifier certains éléments, comme ici les expressions faciales émotionnelles.

Pour un outil d'apprentissage en Réalité Virtuelle, on peut imaginer étendre cette utilisation à d'autres démarches de conception.

Il est par exemple parfaitement envisageable de chercher à faire passer des utilisateurs experts sur l'outil d'apprentissage. En enregistrant et en analysant leurs comportements, il serait ainsi possible d'ajuster différents éléments tels que la fidélité de l'environnement, ou encore les métriques d'évaluation analysées par le système.

Au delà de l'utilisation "pour former", la caractéristique anthropocentrée de la Réalité Virtuelle peut donc être un levier tout intéressant "pour concevoir" un outil de formation.

Conclusion

Dans le contexte de démocratisation des technologies immersives ayant précédé les travaux de thèse, nous avons identifié la problématique de réalisation d'environnements de formation pertinents en Réalité Virtuelle.

Par conséquent, nous avons cherché à définir et utiliser des méthodologies de conception et d'expérimentation, permettant d'analyser la pertinence de tels outils.

Nous avons exploré différents cas d'usage, ayant donné lieu à plusieurs contributions présentées dans ce document.

I Résumé des contributions

Dans le Chapitre 2, nous avons tout d'abord proposé une *représentation du cadre terminologique propre à la formation*. En explorant diverses nuances inter-domaines, celle-ci place la compétence au centre d'une articulation de différents savoirs, savoir-faire et savoir-être, reposant eux-mêmes sur différentes connaissances et habiletés.

Ayant identifié la nécessité d'une utilisation efficiente d'outils statistiques dans notre domaine, nous avons également repris et étendu une *méthodologie statistique* permettant de comparer des données en fonction de leur type et de leur provenance.

Nous avons ensuite exploré l'utilisation de la Réalité Virtuelle pour la formation au travers de deux cas d'usage.

Présenté dans le Chapitre 3, le premier cas d'usage a permis de s'intéresser à la *formation aux savoir-faire procéduraux*. Nous nous sommes en effet penchés sur la formation à la procédure de calibration de la lunette infrarouge du fantassin de l'Armée de Terre.

Nous avons proposé un prototype d'outil de formation en Réalité Virtuelle, que nous avons expérimenté afin d'en évaluer la pertinence.

Les résultats ont tout d'abord permis d'identifier certaines lacunes de fidélité. Malgré celles-ci, nous avons pu relever que les sujets étaient plus motivés intrinsèquement en utilisant le prototype. Les sujets ont aussi eu besoin de moins d'essais avant d'atteindre par la suite un sans-fautes sur le logiciel de formation traditionnel.

Cependant, nous avons vu que cette plus-value s'accompagnait d'un temps de formation accru, qu'il est nécessaire de prendre en compte afin de juger de la pertinence pédagogique de l'outil de formation en Réalité Virtuelle.

Dans le Chapitre 4, nous avons ensuite exploré le thème de la formation aux compétences sociales.

Nous avons tout d'abord proposé une *représentation des compétences sociales* en nous appuyant sur celle présentée dans le Chapitre 2.

Nous nous sommes ensuite intéressés à deux cas d'usage de formation, respectivement destinés à la formation des managers et des commerciaux. Nous avons identifié différentes problématiques inhérentes aux formations traditionnelles pour ces cas d'usage.

Afin de chercher à y répondre, nous avons alors analysé la littérature. Cet état de l'art nous a notamment amené à proposer l'*espace Interaction-Perception*, une méthode destinée à situer les travaux en fonction de leurs degrés de perception et d'interaction avec des agents conversationnels incarnés.

En nous inspirant de cette analyse de la littérature, nous avons proposé un prototype d'outil de formation en Réalité Virtuelle. L'analyse de sa pertinence a ainsi permis plusieurs contributions sous forme de questionnaires (évaluation, confiance en soi, etc.). Elle nous a aussi amené à proposer des méthodologies statistiques afin d'analyser la présence des cybermalaises et de traiter les résultats de données qualitatives issues de questionnaires remplis par plusieurs évaluateurs. Enfin, nous avons proposé et utilisé une méthode permettant d'évaluer l'occupation de l'espace des apprenants, lors de prises de parole publiques en Réalité Virtuelle.

Les résultats des expérimentations ont notamment permis d'identifier de nombreuses pistes d'amélioration afin d'atteindre un outil potentiellement pertinent. L'interaction avec les personnages virtuels devrait ainsi être améliorée. Nous avons également remarqué qu'une phase de familiarisation à l'interaction sociale serait recommandable. Enfin, les résultats ont permis de mettre en avant la question du positionnement de l'évaluateur, nécessitant l'implémentation de métriques objectives.

Malgré ces améliorations nécessaires, les expérimentations ont permis d'identifier l'intérêt de l'utilisation de l'outil, selon le niveau d'expertise des apprenants.

Enfin, les résultats ont aussi permis de soulever certains questionnements et hypothèses quant à l'utilisation de la Réalité Virtuelle pour la formation aux compétences sociales. Ils nécessitent par exemple des expérimentations supplémentaires afin de déterminer si l'interface visuelle influe sur la perception des expressions faciales émotionnelles, si les troubles de la vision ont une incidence sur les cybermalaises, ou encore si les apprenants sont moins vigilants à leurs habiletés émettrices lors de l'utilisation d'un visiocasque.

Suite aux travaux sur ce cas d'usage, nous avons constaté que les expressions faciales émotionnelles des personnages virtuels n'étaient pas correctement perçues.

Dans le Chapitre 5, nous avons rapporté l'utilisation de la Réalité Virtuelle afin de répondre à cette problématique et concevoir des expressions faciales émotionnelles pertinentes. En utilisant cette technologie afin de dessiner les expressions faciales émotionnelles à partir de la perception des utilisateurs, nous avons ainsi souhaité améliorer leur pertinence de conception.

Nous avons donc proposé plusieurs contributions, parmi lesquelles des prototypes permettant de dessiner, trier et évaluer des expressions faciales émotionnelles. Nous les avons intégré au sein d'une méthode d'expérimentation générale, en proposant des méthodologies statistiques permettant de dessiner et d'évaluer les expressions les plus représentatives.

Nous avons ainsi évalué les dessins d'expressions conçus à partir de la perception des sujets, en les comparant à d'autres dessins issus de la littérature et proposés par un outil d'animation. Pour plusieurs expressions, les résultats ont montré que les dessins provenant de la perception des sujets avaient été perçus comme plus représentatifs.

Ces résultats ont permis d'observer l'intérêt de l'utilisation de la Réalité Virtuelle, afin d'améliorer la pertinence de conception d'un outil d'apprentissage. En permettant de capter la perception et les comportements des apprenants, la caractéristique anthropocentrée fait ainsi de la Réalité Virtuelle un outil tout autant intéressant pour concevoir des environnements de formation pertinents.

II Limites des travaux

Nous identifions cependant plusieurs limites générales aux travaux présentés dans ce document. Elles concernent notamment l'utilisation fréquente de mesures subjectives, ainsi que la méthodologie appliquée pour en traiter certains résultats.

1. Limites liées à l'utilisation d'échelles de mesure subjectives

À diverses reprises, nous avons utilisé des échelles de mesure subjectives. Ce fut notamment le cas pour analyser la sensation de présence, les cybermalaises, les évaluations ou encore la confiance en soi des sujets.

Il faut noter que l'utilisation de ces échelles de mesure subjectives comportent certaines limites. Utiliser ces méthodes peut en effet présenter certains biais liés à des conflits entre les sensations, les émotions et les connaissances des sujets, lorsqu'ils établissent leur introspection [114].

Pour la sensation de présence par exemple, le fait de savoir comment fonctionne un environnement virtuel, ou de se souvenir de la manière dont on y est entré, peut influencer les sujets dans l'analyse des sensations au moment de répondre aux différentes questions. Utiliser uniquement des échelles de mesure subjectives pour évaluer la sensation de présence doit ainsi être considéré comme un simple indicateur. Les combiner à d'autres types de mesures (e.g. mesures objectives), peut être une solution pour limiter l'effet de ces biais.

On peut étendre cette limite aux autres échelles de mesure subjectives, pour lesquelles l'introspection des sujets ou des formateurs peut être biaisée par divers facteurs extérieurs.

Pour pallier cette limite, il est possible de compléter ces prises de mesures par d'autres méthodes subjectives, voir par des méthodes objectives.

Pour garder l'exemple de la sensation de présence, il est ainsi parfaitement envisageable de croiser les résultats obtenus, à ceux récoltés par le biais méthodes subjectives (e.g. comparaison entre monde réel et virtuel, mesures quantitatives subjectives, etc.) et/ou objectives (e.g. mesures physiologiques, réponses posturales, etc.).

2. Limites de la méthodologie statistique

L'utilisation des outils d'analyse de données quantitatives pour analyser des données qualitatives est d'un usage fréquent en sciences humaines (e.g. sciences de l'éducation, psychologie, etc.). Cette utilisation nécessite d'associer à chaque variable qualitative une valeur quantitative, comme par exemple des notes en sciences de l'éducation, des scores de QI en psychologie, etc.

Dans nos travaux, nous nous sommes conformés à cet usage lorsque les variables qualitatives étaient ordinales comme par exemples issues d'une échelle de Likert. Nous avons par exemple calculé puis comparé des moyennes sur les questionnaires de sensation de présence (IPQ).

Comme nous l'avons mentionné dans le Chapitre 2, traiter des données qualitatives comme s'il existait une bijection entre l'espace qualitatif et un espace quantitatif prête à discussions dans différentes communautés des statistiques.

Prenons en effet l'exemple d'une échelle de douleur ressentie et associons cette douleur à une cause quantitative (chaleur, contrainte de pression, décharge électrique, etc.). Pour deux variables quantitatives identiques, la sensation de douleur varie d'un sujet à l'autre. Supposons que l'on demande à chaque individu d'évaluer, sur une échelle de Likert de 5 degrés, sa sensation de douleur. Il est fort probable que la valeur médiane de chaque individu ne corresponde pas à la même cause quantitative. De la même façon, l'écart de valeur entre deux degrés varie aussi d'un individu à l'autre.

Affecter une valeur à chaque degré (de 1 à 5 par exemple) et en faire des moyennes n'a donc aucun sens.

La seule chose qui serait normalement respectée entre les différents individus devrait être l'ordre de chaque valeur, ce qui laisse entendre que les statistique d'ordre doivent être privilégiées pour des variables qualitative.

Cette remarque est encore plus pertinente si on considère l'utilisation d'échelles de Likert pour mesurer un degré d'accord avec une affirmation (e.g. "Tout à fait d'accord", "D'accord", "Plutôt d'accord", "Pas d'accord", "Pas du tout d'accord", etc.). Encore une fois, l'écart ressenti entre chaque label a peu de chance d'être identique pour tous les individus questionnés. Il est par exemple possible qu'une personne ressente les valeurs "Pas d'accord" et "Pas du tout d'accord" plus proche que ne le sont "D'accord" et "Tout à fait d'accord". Créer une bijection entre l'espace qualitatif et un espace de valeurs réelles, puis appliquer des opérateurs statistiques dessus, ne permet pas de réaliser une analyse des données qualitative fiable.

De ce fait, la méthodologie que nous avons proposé au Chapitre 2 utilise des tests statistiques paramétriques uniquement lorsque les variables sont quantitatives. Pour des variables qualitatives ordinales, nous avons proposé d'utiliser des tests non paramétriques issus des statistiques d'ordre.

L'utilisation de ces tests reste cependant également discutable et constitue une des limites de nos travaux.

III Perspectives

Les travaux présentés dans ce document ouvrent d'autres perspectives que l'amélioration de la méthodologie statistique. Plus globalement, nos travaux soulèvent également la nécessité d'un modèle théorique, permettant de concevoir des environnements informatiques de formation pertinents utilisant les technologies immersives.

1. Continuité des travaux

1.1. Hypothèses soulevées

Plusieurs hypothèses découlent des observations effectuées lors des expérimentations.

Pour la formation aux savoir-faire procéduraux, nous avons notamment observé que les sujets semblaient accorder une concentration importante à leurs différentes sensations, sans qu'elles ne soient liées de près à l'apprentissage de la procédure. Ceux-ci ont également indiqué une sensation de calme lors de l'exécution de la procédure en Réalité Virtuelle.

Nous avons ainsi supposé que la sensation de présence pouvait être à l'origine de cet effet. Accroître la concentration des apprenants en l'utilisant peut ainsi être un levier d'apprentissage intéressant.

Le cas d'usage de la formation aux compétences sociales a permis d'émettre un nombre important d'hypothèses.

Parmi celles-ci, nous avons notamment relevé que l'interface visuelle utilisée a potentiellement un effet sur la perception des expressions faciales émotionnelles. Nous avons également souligné que les troubles de la vision des sujets pourraient avoir une incidence sur les cybermalaises. Il a aussi semblé que les sujets fassent preuve d'une meilleure gestion d'émotions en Réalité Virtuelle. Enfin, les apprenants seraient potentiellement moins vigilants à leurs habiletés émettrices lorsqu'ils utilisent un visiocasque.

Ces différentes hypothèses nécessitent des travaux supplémentaires afin d'être vérifiées puis étudiées. Ces études permettraient ainsi d'apporter des recommandations supplémentaires sur la conception et l'utilisation d'outils de formation pertinents en Réalité Virtuelle.

1.2. Reprise et approfondissement des contributions

Les contributions proposées dans ce document nécessitent également d'être approfondies par des travaux supplémentaires.

Nous avons par exemple introduit la notion de "pertinence pédagogique", que nous avons cherché à analyser en étudiant les plus-values d'apprentissage sur les apprenants. Si nous avons également analysé les temps de formation sur le cas d'usage de formation aux savoir-faire procéduraux, cette dimension manque en revanche de s'intéresser à l'utilisabilité et aux autres bénéfices de l'outil pour les formateurs.

Un environnement de formation devant nécessairement rester un outil à disposition des formateurs, il nous semble important d'élargir la démarche d'étude de la pertinence pédagogique, en analysant également l'acceptabilité et l'intérêt de l'outil par ceux-ci.

Nous avons proposé un espace permettant de situer les travaux utilisant des agents conversationnels incarnés via les technologies immersives. Cet espace s'étend ainsi sur deux dimensions : l'interaction et la perception.

Le degré de perception est en effet seulement évalué sur la dimension visuelle. Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 2, la perception humaine ne s'étend pas seulement au visuel. Inclure par exemple la mesure des degrés de perception sonores ou tactiles peut ainsi être un axe de travaux supplémentaires. Les mesures des degrés d'interaction pourraient également faire l'objet d'améliorations. Si les interactions verbales et non-verbales sont évaluées, les interactions physiques pourraient l'être tout autant (e.g. possibilité de se serrer la main).

Pour les différents cas d'usage explorés dans ce document, nous avons proposé divers questionnaires et grilles d'évaluation.

Comme nous l'avons mentionné à plusieurs reprises, ces éléments ont été élaborés de manière empirique, en collaboration avec des formateurs métier.

Ils comportent une grande part de subjectivité et n'ont été ni éprouvés et ni validés statistiquement au préalable. Ils ne permettent donc pas de garantir une vision globalement fiable de l'élément analysé (e.g. compétence globale, types de savoirs, types d'habiletés, conscience de soi, confiance en soi, etc.). Il est donc possible que des questions se posent concernant l'intérêt de certains items.

Afin d'améliorer ces grilles et questionnaires, il serait donc nécessaire d'apporter une dimension sciences humaines, chose que nous n'avons pas été en mesure de faire dans le cadre de nos travaux. Les items composant ces contributions nécessiteraient notamment d'être revus. Il faudrait également utiliser ces éléments sur un nombre conséquent de sujets, puis les éprouver statistiquement.

Pour chacun d'entre eux, il peut être intéressant de :

1. Les utiliser sur un nombre conséquent de sujets, puis d'en mesurer la cohérence interne (i.e. la fiabilité).

Pour ce faire, utiliser le coefficient α de Cronbach [213] peut être judicieux. Cette statistique, souvent utilisée dans le domaine de la psychologie, permet d'estimer la fiabilité d'un test. Comprise entre 0 et 1, sa valeur est généralement jugée satisfaisante lorsqu'elle passe 0.7. Si tel n'était pas le cas, il serait alors nécessaire de revoir la grille ou le questionnaire, puis de réitérer jusqu'à ce que le coefficient soit acceptable.

2. Le simplifier en effectuant une analyse factorielle.

Certains questionnaires comportent un nombre important d'items (e.g. les questionnaires de confiance en soi proposés au Chapitre 4 se composent d'une cinquantaine d'items).

Pour ces éléments, il serait nécessaire de réduire leur taille afin d'en améliorer l'efficacité. Pour cela, il peut être intéressant d'effectuer une analyse factorielle afin de déterminer quels sont les items les plus corrélés. Cette méthode, également utilisée en sciences humaines [133], permettrait ainsi de sélectionner les items selon leur degré de corrélation, pour affiner la grille ou le questionnaire concerné.

3. Utiliser les versions simplifiées sur un nombre conséquent de sujets, afin d'en mesurer puis de comparer la cohérence interne.

Afin de vérifier la pertinence de l'élément simplifié produit, il serait alors nécessaire de calculer et d'analyser son α de Cronbach. Il serait également intéressant de comparer les coefficients, de sorte à établir si la version simplifiée est au mieux aussi fiable que la version initiale.

2. Vers un modèle pour la conception d'outils de formation pertinents utilisant les technologies immersives

Les travaux présentés dans ce document visent à répondre aux enjeux de conception d'environnements de formation pertinents en Réalité Virtuelle.

Les enjeux de pertinence que nous avons abordé pour la Réalité Virtuelle s'étendent plus globalement aux technologies immersives.

Un modèle permettant de sélectionner une technologie et de concevoir des fonctionnalités, tout en respectant des précautions propres à ces technologies, peut être une contribution importante. À partir des caractéristiques de la situation et du sujet d'apprentissage, elle peut notamment permettre d'aboutir plus souvent à des environnements d'apprentissage pertinents utilisant les technologies immersives.

Parmi les caractéristiques du sujet d'apprentissage, la question du type de savoir concerné serait notamment primordiale.

En effet, selon le type de savoirs, il se peut que les réponses les plus pertinentes à apporter diffèrent. Lors de notre analyse de la littérature sur la formation aux compétences sociales, nous avons par exemple vu que pour les savoir-faire cognitifs, un fort niveau d'interaction était souvent nécessaire. Pour les savoir-faire procéduraux, nous avons en revanche observé l'inverse. Une des différences entre ces deux types de savoirs provient notamment de la méthode d'acquisition. Les savoir-faire cognitifs se développent par la mise en situation, alors que les savoir-faire procéduraux s'acquièrent par la répétition. De ce fait, les réponses techniques et fonctionnelles à apporter peuvent être différentes.

Des travaux supplémentaires seraient donc nécessaires afin d'identifier et d'expérimenter les nuances des différents types de savoirs, ainsi que les besoins techniques et fonctionnels qu'elles impliquent.

Dans le cadre de nos travaux, nous avons essayé d'apporter une modeste contribution à cet enjeu de taille. Nous avons pour cela couvert différents savoirs et compétences. Si, au sein de ce document, nous rapportons des travaux sur les savoir-faire procéduraux et sur les compétences sociales, notons toutefois que nous avons aussi brièvement exploré l'utilisation des technologies immersives pour l'assimilation et l'illustration de connaissances déclaratives. Ces travaux n'ont pas été mentionnés dans ce document, mais ils ont cependant fait l'objet de diverses communications et publications [214, 215, 216].

Un tel modèle devrait également s'intéresser à l'expérience utilisateur au sein des environnements d'apprentissage virtuels, mixtes et augmentés.

Dans ce document, nous avons fréquemment exploré certains aspects de ce domaine, sans forcément le nommer. Dans l'optique de l'élaboration d'un modèle pour la conception d'outils de formation immersifs, il serait intéressant de l'explorer. Certains auteurs se penchent notamment déjà sur l'élaboration de modèles pour l'expérience utilisateur en Réalité Virtuelle [217]. Capitaliser sur les contributions apportées par ces travaux serait donc judicieux.

L'étude de l'utilisation des technologies immersives pour l'apprentissage compte de nombreux travaux effectués ces dernières décennies. Nous avons évoqué la pluralité des cas d'usage traités dans la littérature et l'accélération des initiatives liée à l'émergence de ces technologies pour le grand public. Une telle contribution serait donc une perspective primordiale à apporter aux travaux présentés dans ce document. Elle permettrait d'éviter qu'un nombre important de solutions peu pertinentes, ne conduisent à un rejet de ces technologies pourtant très prometteuses.

Bibliographie

- [1] Michel Fabre. Dewey et le triangle de la formation. *Questions Vives. Recherches en éducation*, (27), 2017. 11, 26
- [2] Sébastien Bottecchia. *Système TAC : Télé-Assistance Collaborative. Réalité augmentée et NTIC au service des opérateurs et des experts dans le cadre d'une tâche de maintenance industrielle supervisée*. PhD thesis, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2010. 11, 27, 28, 31, 35, 38
- [3] Didier Jedliczka, Gilles Delahaye, and Jack G Horgan. *Compétences et alternances*. Ed. Liaisons, 1994. 11, 35
- [4] Philippe Fuchs. *Virtual Reality Headsets-a Theoretical and Pragmatic Approach*. CRC Press, 2017. 11, 37
- [5] Nancy Rodriguez. Identifying accessibility conditions for children with multiple disabilities : a virtual reality wheelchair simulator. In *2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, pages 370–372. IEEE, 2018. 11, 38
- [6] Quinate Chioma Ihemedu-Steinke, Rainer Erbach, Prashanth Halady, Gerrit Meixner, and Michael Weber. Virtual reality driving simulator based on head-mounted displays. In *Automotive user interfaces*, pages 401–428. Springer, 2017. 11, 38
- [7] Georg Rauter, Roland Sigrist, Claudio Koch, Francesco Crivelli, Mark van Raai, Robert Riener, and Peter Wolf. Transfer of complex skill learning from virtual to real rowing. *PLoS one*, 8(12), 2013. 11, 38
- [8] Silvia Filippini-Fantoni and Jonathan P Bowen. Mobile multimedia : Reflections from ten years of practice. *Digital technologies and the museum experience : Handheld guides and other media*, pages 79–96, 2008. 11, 40
- [9] Chaowan Khundam. *Evaluation of the virtual reality usage for the promotion of historical heritage*. PhD thesis, 2019. 11, 40
- [10] Paul Milgram and Fumio Kishino. A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 77(12) :1321–1329, 1994. 11, 39, 40
- [11] Isaac Wang, Jesse Smith, and Jaime Ruiz. Exploring virtual agents for augmented reality. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1–12, 2019. 11, 41
- [12] Patrick Kenny, Arno Hartholt, Jonathan Gratch, William Swartout, David Traum, Stacy Marsella, and Diane Piepol. Building interactive virtual humans for training environments. In *Proceedings of i/itsec*, volume 174, 2007. 11, 12, 41, 105, 106, 244

- [13] Bernhard E Riecke, Jörg Schulte-Pelkum, Marios N Avraamides, Markus Von Der Heyde, and Heinrich H Bülthoff. Scene consistency and spatial presence increase the sensation of self-motion in virtual reality. In *Proceedings of the 2nd symposium on Applied perception in graphics and visualization*, pages 111–118, 2005. 11, 43
- [14] Bernhard Kainz. Quantitative measurement and visualization of four-dimensional cardiovascular blood flow. 2007. 11, 43
- [15] Zi Siang See, Mohd Shahrizal Sunar, Mark Billingham, Arindam Dey, Delas Santano, Human Esmaeili, and Harold Thwaites. An augmented reality and virtual reality pillar for exhibitions : A subjective exploration. In *ICAT-EGVE*, pages 79–82, 2017. 11, 44
- [16] Jason Leigh, Andrew Johnson, Luc Renambot, Tom Peterka, Byungil Jeong, Daniel J Sandin, Jonas Talandis, Ratko Jagodic, Sungwon Nam, Hyejung Hur, et al. Scalable resolution display walls. *Proceedings of the IEEE*, 101(1) :115–129, 2012. 11, 44
- [17] Mark Billingham et al. Chapter 14 : Gesture based interaction. *Haptic Input, Aug*, 24, 2011. 11, 45
- [18] Md Hasanuzzaman and Haruki Ueno. Face and gesture recognition for human-robot interaction. *Face Recognition*, page 149, 2007. 11, 45
- [19] Robert W Lindeman, Yasuyuki Yanagida, Haruo Noma, and Kenichi Hosaka. Wearable vibrotactile systems for virtual contact and information display. *Virtual Reality*, 9(2-3) :203–213, 2006. 11, 45
- [20] Nimesha Ranasinghe, Pravar Jain, Shienny Karwita, David Tolley, and Ellen Yi-Luen Do. Ambiotherm : enhancing sense of presence in virtual reality by simulating real-world environmental conditions. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1731–1742, 2017. 11, 45
- [21] Robert Codd-Downey, P Mojiri Forooshani, Andrew Speers, Hui Wang, and Michael Jenkin. From ros to unity : Leveraging robot and virtual environment middleware for immersive teleoperation. In *2014 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, pages 932–936. IEEE, 2014. 11, 46
- [22] Małgorzata Dębska, Jacek Polechoński, Arkadiusz Mynarski, and Piotr Polechoński. Assessment of enjoyment and intensity of physical activity in immersive virtual reality on the omnidirectional omni treadmill and icaros flight simulator in the context of recommendations for health. 2019. 11, 12, 46, 47
- [23] Pascal A Winkes and Jan C Aurich. Method for an enhanced assembly planning process with systematic virtual reality inclusion. *Procedia CIRP*, 37 :152–157, 2015. 12, 47
- [24] Kim Dockx, Lisa Alcock, Esther Bekkers, Pieter Ginis, Miriam Reelick, Elisa Pelosin, Giovanna Lagravinese, Jeffrey M Hausdorff, Anat Mirelman, Lynn Rochester, et al. Fall-prone older people’s attitudes towards the use of virtual reality technology for fall prevention. *Gerontology*, 63(6) :590–598, 2017. 12, 47
- [25] P Robuffo Giordano, JL Souman, R Mattone, A De Luca, MO Ernst, and HH Bülthoff. The cyberwalk platform : human-machine interaction enabling unconstrained walking through vr. In *First workshop for young researchers on Human-friendly robotics*, 2008. 12, 47
- [26] Isadora Salvetti, Alex Ríos, and N Pelechano. Smooth transitioning between two walking metaphors for virtual reality applications. 2019. 12, 48
- [27] Catherine Hamilton-Giachritsis, Domna Banakou, Manuela Garcia Quiroga, Christos Giachritsis, and Mel Slater. Reducing risk and improving maternal perspective-taking and empathy using virtual embodiment. *Scientific reports*, 8(1) :1–10, 2018. 12, 48
- [28] Robert Iacob and Diana Popescu. Haptics democratization : challenges and opportunities. In *MATEC Web of Conferences*, volume 290, page 04006. EDP Sciences, 2019. 12, 48

- [29] Markus Berger and Ralf Bill. Combining vr visualization and sonification for immersive exploration of urban noise standards. *Multimodal Technologies and Interaction*, 3(2) :34, 2019. 12, 52
- [30] Jeff Sauro. *A practical guide to the System Usability Scale (SUS) : Background, benchmarks and best practices*. Denver, CO : Measuring Usability LLC, 2011. 12, 15, 53, 54, 131
- [31] Nirit Gavish, Teresa Gutiérrez, Sabine Webel, Jorge Rodríguez, Matteo Peveri, Uli Bockholt, and Franco Tecchia. Evaluating virtual reality and augmented reality training for industrial maintenance and assembly tasks. *Interactive Learning Environments*, 23(6) :778–798, 2015. 12, 71
- [32] David L Tate, Linda Sibert, and Tony King. Virtual environments for shipboard firefighting training. In *Virtual Reality Annual International Symposium, 1997., IEEE 1997*, pages 61–68. IEEE, 1997. 12, 72
- [33] R Wade Allen, George D Park, Marcia L Cook, and Dary Fiorentino. The effect of driving simulator fidelity on training effectiveness. *DSC 2007 North America*, 2007. 12, 72, 73
- [34] Michael Meehan, Brent Insko, Mary Whitton, and Frederick P Brooks Jr. Physiological measures of presence in stressful virtual environments. *Acm transactions on graphics (tog)*, 21(3) :645–652, 2002. 12, 73, 74
- [35] Faisal Rashid. *Use of VR technology and passive haptics for MANPADS training system*. PhD thesis, Monterey, California : Naval Postgraduate School, 2017. 12, 19, 72, 73, 74
- [36] David DeVault, Johnathan Mell, and Jonathan Gratch. Toward natural turn-taking in a virtual human negotiation agent. In *AAAI Spring Symposium on Turn-taking and Coordination in Human-Machine Interaction*. AAAI Press, Stanford, CA, 2015. 12, 13, 105, 116, 117, 118, 244
- [37] David Traum, William Swartout, Jonathan Gratch, Stacy Marsella, P Kenny, E Hovy, S Narayanan, E Fast, B Martinovsky, R Baghat, et al. Virtual humans for non-team interaction training. In *AAMAS-05 workshop on creating bonds with humanoids*, volume 2, page 5, 2005. 12, 105, 106, 118, 244
- [38] H Chad Lane, Matthew Jensen Hays, Mark G Core, and Daniel Auerbach. Learning intercultural communication skills with virtual humans : Feedback and fidelity. *Journal of Educational Psychology*, 105(4) :1026, 2013. 12, 103, 106, 114, 118, 244
- [39] Keith Anderson, Elisabeth André, Tobias Baur, Sara Bernardini, Mathieu Chollet, Evi Chryssafidou, Ionut Damian, Cathy Ennis, Arjan Egges, Patrick Gebhard, et al. The tardis framework : intelligent virtual agents for social coaching in job interviews. In *Advances in computer entertainment*, pages 476–491. Springer, 2013. 13, 58, 107, 244
- [40] Mohammed Ehsan Hoque, Matthieu Courgeon, Jean-Claude Martin, Bilge Mutlu, and Rosalind W Picard. Mach : My automated conversation coach. In *Proceedings of the 2013 ACM international joint conference on Pervasive and ubiquitous computing*, pages 697–706. ACM, 2013. 13, 58, 103, 107, 108, 117, 244
- [41] Mathieu Chollet, Torsten Wörtwein, Louis-Philippe Morency, and Stefan Scherer. A multimodal corpus for the assessment of public speaking ability and anxiety. In *LREC*, 2016. 13, 57, 58, 108, 109, 116, 244
- [42] Ligia Batrinca, Giota Stratou, Ari Shapiro, Louis-Philippe Morency, and Stefan Scherer. Cicero-towards a multimodal virtual audience platform for public speaking training. In *International Workshop on Intelligent Virtual Agents*, pages 116–128. Springer, 2013. 13, 108, 109, 244
- [43] Mathieu Chollet, Giota Sratou, Ari Shapiro, Louis-Philippe Morency, and Stefan Scherer. An interactive virtual audience platform for public speaking training. In *Proceedings of the 2014 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems*, pages 1657–1658. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2014. 13, 108, 109, 244

- [44] Ionut Damian, Chiew Seng Sean Tan, Tobias Baur, Johannes Schöning, Kris Luyten, and Elisabeth André. Augmenting social interactions : Realtime behavioural feedback using social signal processing techniques. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 565–574. ACM, 2015. 13, 58, 109, 118
- [45] Jan Schneider, Dirk Börner, Peter van Rosmalen, and Marcus Specht. Can you help me with my pitch? studying a tool for real-time automated feedback. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 9(4) :318–327, 2016. 13, 57, 58, 109, 110, 118
- [46] David-Paul Pertaub, Mel Slater, and Chris Barker. An experiment on public speaking anxiety in response to three different types of virtual audience. *Presence : Teleoperators and virtual environments*, 11(1) :68–78, 2002. 13, 110, 116, 244
- [47] Mel Slater, David-Paul Pertaub, Chris Barker, and David M Clark. An experimental study on fear of public speaking using a virtual environment. *CyberPsychology & Behavior*, 9(5) :627–633, 2006. 13, 110, 244
- [48] Frederick W Kron, Michael D Fetzters, Mark W Scerbo, Casey B White, Monica L Lypson, Miguel A Padilla, Gayle A Gliva-McConvey, Lee A Belfore, Temple West, Amelia M Wallace, et al. Using a computer simulation for teaching communication skills : A blinded multisite mixed methods randomized controlled trial. *Patient education and counseling*, 100(4) :748–759, 2017. 13, 103, 111, 114, 116, 244
- [49] Magalie Ochs, Brice Donval, and Philippe Blache. Virtual patient for training doctors to break bad news. In *Workshop, Affect, Compagnon Artificiel, Interaction*, pages non–paginé, 2016. 13, 58, 103, 111, 112, 244
- [50] Sabarish Babu, Evan Suma, Tiffany Barnes, and Larry F Hodges. Can immersive virtual humans teach social conversational protocols? In *Virtual Reality Conference, 2007. VR'07. IEEE*, pages 215–218. IEEE, 2007. 13, 58, 112, 116, 118, 244
- [51] Andrew Cordar, Adam Wendling, Casey White, Samsun Lampotang, and Benjamin Lok. Repeat after me : Using mixed reality humans to influence best communication practices. In *Virtual Reality (VR), 2017 IEEE*, pages 148–156. IEEE, 2017. 13, 112, 113, 116, 118, 244
- [52] Masahiro Mori. The uncanny valley. *Energy*, 7(4) :33–35, 1970. 13, 117
- [53] Mark Scheeff, John Pinto, Kris Rahardja, Scott Snibbe, and Robert Tow. Experiences with sparky, a social robot. In *Socially intelligent agents*, pages 173–180. Springer, 2002. 13, 117
- [54] Chen Liu. *An analysis of the current and future state of 3D facial animation techniques and systems*. PhD thesis, School of Interactive Arts & Technology-Simon Fraser University, 2009. 14, 167, 168, 169, 170, 171
- [55] James Cameron, J Landau, and J Cameron. Avatar [motion picture]. *Santa Monica, CA, United States : Lightstorm Entertainment*, 2009. 14, 169
- [56] Jeffrey F Cohn, Zara Ambadar, and Paul Ekman. Observer-based measurement of facial expression with the facial action coding system. *The handbook of emotion elicitation and assessment*, pages 203–221, 2007. 14, 171
- [57] Reza Amini and Christine Lisetti. Hapfacs : An open source api/software to generate facs-based expressions for ecas animation and for corpus generation. In *Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII), 2013 Humaine Association Conference on*, pages 270–275. IEEE, 2013. 14, 114, 164, 169, 170, 171, 172, 173, 176, 191, 193, 194, 200, 201, 364, 365, 378, 390, 391
- [58] Angela Tinwell, Mark Grimshaw, Debbie Abdel Nabi, and Andrew Williams. Facial expression of emotion and perception of the uncanny valley in virtual characters. *Computers in Human Behavior*, 27(2) :741–749, 2011. 14, 164, 171, 172, 191, 193, 194, 201, 364, 365, 378, 391
- [59] Wallace V Friesen, Paul Ekman, et al. Emfacs-7 : Emotional facial action coding system. *Unpublished manuscript, University of California at San Francisco*, 2(36) :1, 1983. 14, 170, 171, 172, 191, 193, 194, 199, 200, 201, 364, 365, 378, 390, 391

- [60] Frederic I Parke and Keith Waters. *Computer facial animation*. AK Peters/CRC Press, 2008. 14, 171, 172, 191, 193, 194, 199, 200, 203, 364, 365, 378, 390, 391, 392
- [61] C Fabian Benitez-Quiroz, Ronnie B Wilbur, and Aleix M Martinez. The not face : A grammaticalization of facial expressions of emotion. *Cognition*, 150 :77–84, 2016. 14, 170, 171, 172, 202, 365, 392
- [62] Philippe FUCHS. Théorie de la réalité virtuelle, les véritables usages. 2018. 19, 36, 37, 38, 40, 41, 42, 43, 44, 47, 52
- [63] Domitile Lourdeaux. *Réalité virtuelle et formation : conception d’environnements virtuels pédagogiques*. PhD thesis, 2001. 19
- [64] Ronan Querrec. *Les systèmes multi-agents pour les environnements virtuels de formation : application à la sécurité civile*. PhD thesis, Brest, 2003. 19
- [65] Teodor P Grantcharov, Viggo B Kristiansen, Jørgen Bendix, Linda Bardram, Jacob Rosenberg, and Peter Funch-Jensen. Randomized clinical trial of virtual reality simulation for laparoscopic skills training. *British journal of surgery*, 91(2) :146–150, 2004. 19, 71
- [66] Ricardo G Menendez and James E Bernard. Flight simulation in synthetic environments. In *19th DASC. 19th Digital Avionics Systems Conference. Proceedings (Cat. No. 00CH37126)*, volume 1, pages 2A5–1. IEEE, 2000. 19
- [67] Daniel Mellet-d’Huart. *De l’intention à l’attention : contributions à une démarche de conception d’environnements virtuels pour apprendre à partir d’un modèle de l’(én) action*. PhD thesis, Le Mans, 2004. 19
- [68] Christos Bouras, Vasilis Triantafyllou, and Thrasivoulos Tsiatsos. *Aspects of a collaborative learning environment using distributed virtual environments*. Association for the Advancement of Computing in Education (AACE), 2001. 19
- [69] Cédric Buche, Cyril Bossard, Ronan Querrec, and Pierre Chevaillier. Pegase : A generic and adaptable intelligent system for virtual reality learning environments. *International Journal of Virtual Reality*, 9(2) :73–85, 2010. 19
- [70] Bruno Arnaldi, Pascal Guitton, and Guillaume Moreau. *Réalité virtuelle et réalité augmentée : mythes et réalités*. ISTE Group, 2018. 19, 37, 39
- [71] Michel Fabre. Qu’est-ce que la formation ? *Recherche & formation*, 12(1) :119–134, 1992. 25, 27
- [72] John Dewey. *Démocratie et éducation : introduction à la philosophie de l’éducation*. L’Age d’homme, 1983. 26
- [73] Henri Piéron. *Examens et docimologie*, volume 15. Presses universitaires de France, 1963. 27
- [74] Christophe Merlo. *Modélisation des connaissances en conduite de l’ingénierie : mise en œuvre d’un environnement d’assistance aux acteurs*. PhD thesis, Bordeaux 1, 2003. 27
- [75] Jacques Tardif. Pour un enseignement stratégique : L’apport de la psychologie cognitive (french edition), 1992. 28, 29
- [76] John R Anderson. *The architecture of cognition*. Psychology Press, 2013. 28
- [77] Xavier Roegiers. Savoirs, capacités et compétences à l’école : une quête de sens. In *Forum-pédagogies, mars*, pages 24–31, 1999. 29, 30, 34
- [78] Philippe Meirieu. *Apprendre... oui, mais comment*. ESF Sciences Humaines, 2017. 29
- [79] Françoise Raynal and Alain Rieunier. *Pédagogie, dictionnaire des concepts clés : apprentissages, formation, psychologie cognitive*. ESF Sciences Humaines, 2018. 29, 30, 34, 35
- [80] Didier Delignières. Vers une pédagogie des compétences : apprendre à gérer la complexité. *Innovations théoriques en STAPS et implications pratiques en EPS*. Paris : L’Harmattan, 2014. 30

- [81] Alain Klarsfeld. *La compétence, ses définitions, ses enjeux*. Gestion 2000, 2000. 30
- [82] Richard Wittorski. *Analyse du travail et production de compétences collectives*. Editions L'Harmattan, 1997. 30
- [83] Guy Le Boterf. *L'ingénierie des compétences*. Ed. d'organisation, 1999. 30
- [84] Louis d'Hainaut and Armand Biancheri. *Des fins aux objectifs de l'éducation : un cadre conceptuel et une méthode générale pour établir les résultats attendus d'une formation*. Fernand Nathan, 1983. 30
- [85] Yves Palazzeschi. *Manuel du formateur : Ingénierie pédagogique*. Yves Palazzeschi, 2015. 30
- [86] Guy Le Boterf. De la compétence. *Essai sur un attracteur étrange*, 1994. 31, 32, 33, 34
- [87] Guy Le Boterf. *Compétence et navigation professionnelle*. Editions d'organisation, 2000. 32, 33, 34
- [88] M Parlier. La compétence, nouveau modèle de gestion des ressources humaines. *personnel*, (366) :41–44, 1996. 34
- [89] Jacques Grégoire. *Évaluer les apprentissages : les apports de la psychologie cognitive*. De Boeck Supérieur, 2008. 34
- [90] Christian Darvogne and Didier Noyé. Organiser le travail pour qu'il soit formateur. *Quels dispositifs mettre en œuvre*, 3, 2000. 34
- [91] Antonin Artaud. *Le théâtre et son double*. Éditions Payot, 2019. 37
- [92] Bruno Arnaldi, Philippe Fuchs, and Jacques Tisseau. Chapitre 1 du volume 1 du traité de la réalité virtuelle. *Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris*, 1, 2003. 37
- [93] Philippe Fuchs, Guillaume Moreau, and Alain Berthoz. Le traité de la réalité virtuelle volume 1 : L'homme et l'environnement virtuel, 2006. 37
- [94] TP Caudell and DW Mizell. Augmented reality : an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. In *Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences*, volume 2, pages 659–669. IEEE, 1992. 38
- [95] Ronald T Azuma. A survey of augmented reality. *Presence : Teleoperators and virtual environments*, 6(4) :355–385, 1997. 38
- [96] Paul Milgram, Haruo Takemura, Akira Utsumi, and Fumio Kishino. Augmented reality : A class of displays on the reality-virtuality continuum. In *Telem manipulator and telepresence technologies*, volume 2351, pages 282–292. International Society for Optics and Photonics, 1995. 39
- [97] Marvin Minsky. Telepresence. 1980. 49
- [98] Mel Slater, Martin Usoh, and Anthony Steed. Depth of presence in virtual environments. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 3(2) :130–144, 1994. 49, 55
- [99] Karl-Erik Bystrom, Woodrow Barfield, and Claudia Hendrix. A conceptual model of the sense of presence in virtual environments. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 8(2) :241–244, 1999. 49
- [100] Fabrizia Mantovani and Gianluca Castelnuovo. The sense of presence in virtual training : enhancing skills acquisition and transfer of knowledge through learning experience in virtual environments. 2003. 49, 51
- [101] Matthew Lombard and Theresa Ditton. At the heart of it all : The concept of presence. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2) :0–0, 1997. 49, 55, 253
- [102] Bob G Witmer and Michael J Singer. Measuring presence in virtual environments : A presence questionnaire. *Presence*, 7(3) :225–240, 1998. 50, 51, 54

- [103] Dahai Liu, Nikolas D Macchiarella, and Dennis A Vincenzi. Simulation fidelity. *Human factors in simulation and training*, pages 61–73, 2008. 50
- [104] Richard K Reznick and Helen MacRae. Teaching surgical skills—changes in the wind. *New England Journal of Medicine*, 355(25) :2664–2669, 2006. 50
- [105] Thomas W Schubert. The sense of presence in virtual environments : A three-component scale measuring spatial presence, involvement, and realness. *Zeitschrift für Medienpsychologie*, 15(2) :69–71, 2003. 50, 54, 252
- [106] Kay Stanney and Gavriel Salvendy. Aftereffects and sense of presence in virtual environments : Formulation of a research and development agenda. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 10(2) :135–187, 1998. 51
- [107] Martin Usoh, Christina Alberto, and Mel Slater. Presence : experiments in the psychology of virtual environments. *Department of Computer Science, University College London, UK*, 1996. 51
- [108] Michael E McCauley and Thomas J Sharkey. Cybersickness : Perception of self-motion in virtual environments. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 1(3) :311–318, 1992. 51
- [109] Robert S Kennedy, Norman E Lane, Kevin S Berbaum, and Michael G Lienthal. Simulator sickness questionnaire : An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The international journal of aviation psychology*, 3(3) :203–220, 1993. 51, 56, 139, 236
- [110] Charles M Oman. Sensory conflict in motion sickness : an observer theory approach. 1989. 52
- [111] Joseph J LaViola Jr. A discussion of cybersickness in virtual environments. *ACM Sigchi Bulletin*, 32(1) :47–56, 2000. 52
- [112] James T Reason and Joseph John Brand. *Motion sickness*. Academic press, 1975. 52
- [113] John Brooke et al. Sus-a quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry*, 189(194) :4–7, 1996. 53, 131
- [114] Carlos Coelho, JG Tichon, Trevor J Hine, GM Wallis, and Giuseppe Riva. Media presence and inner presence : the sense of presence in virtual reality technologies. In *From communication to presence : Cognition, emotions and culture towards the ultimate communicative experience*, pages 25–45. IOS Press, Amsterdam, 2006. 54, 55, 208
- [115] RS Kalawsky, ST Bee, and SP Nee. Human factors evaluation techniques to aid understanding of virtual interfaces. *BT technology Journal*, 17(1) :128–141, 1999. 54
- [116] Mel Slater and Martin Usoh. Representations systems, perceptual position, and presence in immersive virtual environments. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 2(3) :221–233, 1993. 54
- [117] Bob G Witmer and Michael F Singer. Measuring presence in virtual environments. Technical report, ARMY RESEARCH INST FOR THE BEHAVIORAL AND SOCIAL SCIENCES ALEXANDRIA VA, 1994. 54
- [118] Claudia Mary Hendrix. Exploratory studies on the sense of presence in virtual environments as a function of visual and auditory display parameters. Master’s thesis, Citeseer, 1994. 54
- [119] Albert S Carlin, Hunter G Hoffman, and Suzanne Weghorst. Virtual reality and tactile augmentation in the treatment of spider phobia : a case report. *Behaviour research and therapy*, 35(2) :153–158, 1997. 54
- [120] Rensis Likert. A technique for the measurement of attitudes. *Archives of psychology*, 1932. 54
- [121] Bob G Witmer, Christian J Jerome, and Michael J Singer. The factor structure of the presence questionnaire. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 14(3) :298–312, 2005. 54
- [122] Rosa María Baños, Cristina Botella, Azucena Garcia-Palacios, Helena Villa, Concepción Perpiñá, and Mariano Alcaniz. Presence and reality judgment in virtual environments : a unitary construct ? *CyberPsychology & Behavior*, 3(3) :327–335, 2000. 55

- [123] Jane Lessiter, Jonathan Freeman, Edmund Keogh, and Jules Davidoff. A cross-media presence questionnaire : The itc-sense of presence inventory. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 10(3) :282–297, 2001. 55
- [124] Jeremy N Bailenson, Jim Blascovich, Andrew C Beall, and Jack M Loomis. Equilibrium theory revisited : Mutual gaze and personal space in virtual environments. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 10(6) :583–598, 2001. 55, 252
- [125] Matthew Lombard, Lisa Weinstein, and Theresa Ditton. Measuring telepresence : The validity of the temple presence inventory (tpi) in a gaming context. In *ISPR 2011 : The International Society for Presence Research Annual Conference*. Edinburgh, 2011. 55, 253
- [126] Rosa María Baños, Cristina Botella, Mariano Alcañiz, Víctor Liaño, Belén Guerrero, and Beatriz Rey. Immersion and emotion : their impact on the sense of presence. *Cyberpsychology & behavior*, 7(6) :734–741, 2004. 55
- [127] Jonathan Freeman, Steve E Avons, Ray Meddis, Don E Pearson, and Wijnand IJsselsteijn. Using behavioral realism to estimate presence : A study of the utility of postural responses to motion stimuli. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 9(2) :149–164, 2000. 55
- [128] Alistair Sutcliffe. *Multimedia and virtual reality : designing multisensory user interfaces*. Psychology Press, 2003. 56
- [129] Richard M Ryan and Edward L Deci. Intrinsic and extrinsic motivations : Classic definitions and new directions. *Contemporary educational psychology*, 25(1) :54–67, 2000. 56
- [130] Robert Stone. Virtual reality for interactive training : an industrial practitioner’s viewpoint. *International Journal of Human-Computer Studies*, 55(4) :699–711, 2001. 56
- [131] Robert J Vallerand, Luc G Pelletier, Marc R Blais, Nathalie M Briere, Caroline Senecal, and Evelyne F Vallieres. The academic motivation scale : A measure of intrinsic, extrinsic, and amotivation in education. *Educational and psychological measurement*, 52(4) :1003–1017, 1992. 57
- [132] Gordon L Paul. *Insight vs. desensitization in psychotherapy : An experiment in anxiety reduction*. Stanford University Press, 1966. 57
- [133] Julie N Hook, Clifford A Smith, and David P Valentiner. A short-form of the personal report of confidence as a speaker. *Personality and Individual Differences*, 44(6) :1306–1313, 2008. 57, 126, 129, 211
- [134] W Lewis Johnson, Carole Beal, Anna Fowles-Winkler, Ursula Lauper, Stacy Marsella, Shrikanth Narayanan, Dimitra Papachristou, and Hannes Vilhjálmsón. Tactical language training system : An interim report. In *Intelligent Tutoring Systems*, pages 336–345. 2004. 57, 103, 111, 244
- [135] Matthew J Hays, Julia C Campbell, Matthew A Trimmer, Joshua C Poore, Andrea K Webb, and Teresa K King. Can role-play with virtual humans teach interpersonal skills? Technical report, UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA LOS ANGELES INST FOR CREATIVE TECHNOLOGIES, 2012. 58, 103, 113, 116, 244
- [136] Geoffrey Frank, Curry Guinn, Robert Hubal, Pamela Pope, Martha Stanford, and Deborah Lamm-Weisel. Just-talk : An application of responsive virtual human technology. In *Proceedings of the Interservice/Industry Training, Simulation and Education Conference*, pages 773–779, 2002. 58, 244
- [137] GDR IG-RV. Journées jeunes chercheurs du gdr ig-rv. In *Semaine de l’Informatique Graphique et de la Réalité Virtuelle - Actes*, Rennes 2017. 58
- [138] Student. The probable error of a mean. *Biometrika*, pages 1–25, 1908. 60, 61
- [139] Henry B Mann and Donald R Whitney. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The annals of mathematical statistics*, pages 50–60, 1947. 60

- [140] Samuel Sanford Shapiro and Martin B Wilk. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3/4) :591–611, 1965. 61
- [141] Morton B Brown and Alan B Forsythe. Robust tests for the equality of variances. *Journal of the American Statistical Association*, 69(346) :364–367, 1974. 61
- [142] Frank Wilcoxon. Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics bulletin*, 1(6) :80–83, 1945. 61
- [143] Jacob Cohen. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Routledge, 2013. 62
- [144] Julie Pallant and SPSS Survival Manual. A step by step guide to data analysis using spss for windows. In *SPSS Survival manual*. Open University Press, 2007. 62
- [145] Karl Pearson. X. on the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 50(302) :157–175, 1900. 62, 344
- [146] William G Cochran. Some methods for strengthening the common χ^2 tests. *Biometrics*, 10(4) :417–451, 1954. 63
- [147] Harald Cramér. A contribution to the theory of statistical estimation. *Scandinavian Actuarial Journal*, 1946(1) :85–94, 1946. 63
- [148] Ronald Aylmer Fisher. *Statistical methods for research workers*. Genesis Publishing Pvt Ltd, 2006. 63, 196, 346
- [149] Neal E Seymour, Anthony G Gallagher, Sanziana A Roman, Michael K O'brien, Vipin K Bansal, Dana K Andersen, and Richard M Satava. Virtual reality training improves operating room performance : results of a randomized, double-blinded study. *Annals of surgery*, 236(4) :458, 2002. 71
- [150] B Barnett, K Helbing, G Hancock, R Heininger, and B Perrin. An evaluation of the training effectiveness of virtual environments. In *Proceedings of the Interservice/Industry Training, Simulation & Education Conference (I/ITSEC)*, 2000. 71
- [151] Michael Macedonia. Games soldiers play. *IEEE Spectrum*, 39(3) :32–37, 2002. 72
- [152] Anthony Clavarelli, William L Platte, and Johnny J Powers. Teaching and assessing complex skills in simulation with application to rifle marksmanship training. Technical report, NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA, 2009. 72
- [153] Brent Edward Insko, M Meehan, M Whitton, and F Brooks. *Passive haptics significantly enhances virtual environments*. PhD thesis, University of North Carolina at Chapel Hill, 2001. 73
- [154] Laure Leroy, Philippe Fuchs, and Guillaume Moreau. Visual fatigue reduction for immersive stereoscopic displays by disparity, content, and focus-point adapted blur. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(10) :3998–4004, 2011. 90
- [155] Pierre Juillet and Jean-François Allilaire. *Dictionnaire de psychiatrie :[français-anglais]*. Conseil international de la langue française ; PUF, 2000. 96
- [156] John M Wiemann. Explication and test of a model of communicative competence. *Human communication research*, 3(3) :195–213, 1977. 96
- [157] Katya Gremaud, Diego Millan, Armando Brana, Alexandra Nguyen, and Jérôme Fravrod. Développer les habiletés sociales par le jeu. *Santé mentale : le mensuel des équipes soignantes en psychiatrie*, (183) :44–48, 2013. 98
- [158] Jérôme Favrod, A McQuillan, V Pomini, and FP Ferrero. Training interpersonal problem-solving skills in french-speaking switzerland. *International Review of Psychiatry*, 10(1) :30–34, 1998. 98

- [159] Lauriane Huguet, Domitile Lourdeaux, and Nicolas Sabouret. Présentation du projet victteams. In *Workshop Affect, Compagnon Artificiel, Interaction (WACAI 2016)*, 2016. 103, 113, 114, 116, 244
- [160] Hazel Morton, Nancie Gunson, and Mervyn Jack. Interactive language learning through speech-enabled virtual scenarios. *Advances in Human-Computer Interaction*, 2012 :23, 2012. 111, 244
- [161] Julie M Sykes, Ana Oskoz, and Steven L Thorne. Web 2.0, synthetic immersive environments, and mobile resources for language education. *Calico Journal*, 2008. 111, 116, 244
- [162] H Chad Lane and Amy E Ogan. Virtual environments for cultural learning. In *Second Workshop on Culturally-Aware Tutoring Systems in AIED 2009 Workshops Proceedings*, 2009. 111, 116, 244
- [163] Michael Emonts, Rebecca Row, W Lewis Johnson, Elizabeth Thomson, Helen de Silva Joyce, LTCOL Giles Gorman, and Robert Carpenter. Integration of social simulations into a task-based blended training curriculum. Land warfare conference, Melbourne, Australia, 2012. 111, 244
- [164] ICSP. Le travail d'équipe et la communication dans les soins de santé : Une analyse documentaire. Technical report, Institut canadien pour la sécurité des patients, Groupe de travail sur le travail d'équipe et les communications, 2011. 112
- [165] Philippe Mathieu, David Panzoli, and Sébastien Picault. Virtual customers in a multiagent training application. *Trans. Edutainment*, 9 :97–114, 2013. 113, 244
- [166] Kyle Johnsen, Robert Dickerson, Andrew Raij, Benjamin Lok, Jonathan Jackson, Min Shin, Jonathan Hernandez, Amy Stevens, and D Scott Lind. Experiences in using immersive virtual characters to educate medical communication skills. In *Virtual Reality, 2005. Proceedings. VR 2005. IEEE*, pages 179–186. IEEE, 2005. 116
- [167] Jesse Fox, Sun Joo Ahn, Joris H Janssen, Leo Yeykelis, Kathryn Y Segovia, and Jeremy N Bailenson. Avatars versus agents : a meta-analysis quantifying the effect of agency on social influence. *Human-Computer Interaction*, 30(5) :401–432, 2015. 116
- [168] David DeVault, Kallirroi Georgila, Ron Artstein, Fabrizio Morbini, David R Traum, Stefan Scherer, Albert Skip Rizzo, and Louis-Philippe Morency. Verbal indicators of psychological distress in interactive dialogue with a virtual human. In *SIGDIAL Conference*, pages 193–202, 2013. 116
- [169] David DeVault, Ron Artstein, Grace Benn, Teresa Dey, Ed Fast, Alesia Gainer, Kallirroi Georgila, Jon Gratch, Arno Hartholt, Margaux Lhommet, et al. Simsensei kiosk : A virtual human interviewer for healthcare decision support. In *Proceedings of the 2014 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems*, pages 1061–1068. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2014. 116
- [170] Jonathan Gratch, Gale M Lucas, Aisha Aisha King, and Louis-Philippe Morency. It's only a computer : the impact of human-agent interaction in clinical interviews. In *Proceedings of the 2014 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems*, pages 85–92. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2014. 116
- [171] Clifford Nass, Youngme Moon, and Nancy Green. Are machines gender neutral? gender-stereotypic responses to computers with voices. *Journal of applied social psychology*, 27(10) :864–876, 1997. 118, 344
- [172] Andrey Kolmogorov. Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione. *Inst. Ital. Attuari, Giorn.*, 4 :83–91, 1933. 139, 282
- [173] Nikolai V Smirnov. Estimate of deviation between empirical distribution functions in two independent samples. *Bulletin Moscow University*, 2(2) :3–16, 1939. 139, 282
- [174] Etienne Peillard, Thomas Thebaud, Jean-Marie Normand, Ferran Argelaguet, Guillaume Moreau, and Anatole Lécuyer. Virtual objects look farther on the sides : The anisotropy of distance perception in virtual reality. In *IEEE VR Conference 2019*, 2019. 155

- [175] Nalini Ambady and Robert Rosenthal. Thin slices of expressive behavior as predictors of interpersonal consequences : A meta-analysis. *Psychological bulletin*, 111(2) :256, 1992. 164, 169, 171
- [176] Jens Allwood. Bodily communication dimensions of expression and content. In *Multimodality in language and speech systems*, pages 7–26. Springer, 2002. 164
- [177] Matthieu Courgeon, Stéphanie Buisine, and Jean-Claude Martin. Impact of expressive wrinkles on perception of a virtual character’s facial expressions of emotions. In *International Workshop on Intelligent Virtual Agents*, pages 201–214. Springer, 2009. 164, 166, 171, 172, 173
- [178] Paul Ekman and Wallace V Friesen. Unmasking the face : A guide to recognizing emotions from facial cues, 1975. 164
- [179] Kazuhiro Hayashi, Tatsunori Ikemoto, Takefumi Ueno, Young-Chang Park Arai, Kazuhiro Shimo, Makoto Nishihara, Shigeyuki Suzuki, and Takahiro Ushida. Discordant relationship between evaluation of facial expression and subjective pain rating due to the low pain magnitude. *Basic and Clinical Neuroscience*, 9(1) :43–50, 2018. 164
- [180] Kenneth M Prkachin. The consistency of facial expressions of pain : a comparison across modalities. *Pain*, 51(3) :297–306, 1992. 164
- [181] Amanda C de C Williams. Facial expression of pain : an evolutionary account. *Behavioral and brain sciences*, 25(4) :439–455, 2002. 164
- [182] Miriam Dyck, Maren Winbeck, Susanne Leiberg, Yuhan Chen, Rurben C Gur, and Klaus Mathiak. Recognition profile of emotions in natural and virtual faces. *PLoS One*, 3(11) :e3628, 2008. 164, 172, 173, 206
- [183] Paul Ekman. Are there basic emotions? 1992. 164
- [184] Paul Ekman. Facial expression and emotion. *American psychologist*, 48(4) :384, 1993. 164
- [185] RJR Blair. Facial expressions, their communicatory functions and neuro-cognitive substrates. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B : Biological Sciences*, 358(1431) :561–572, 2003. 164
- [186] Robert JR Blair and Lisa Cipolotti. Impaired social response reversal : A case ofacquired sociopathy’. *Brain*, 123(6) :1122–1141, 2000. 164
- [187] Dacher Keltner and Cameron Anderson. Saving face for darwin : The functions and uses of embarrassment. *Current directions in psychological science*, 9(6) :187–192, 2000. 164
- [188] Zhigang Deng and Xiaohan Ma. Perceptually guided expressive facial animation. In *Proceedings of the 2008 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pages 67–76. Eurographics Association, 2008. 166
- [189] Nikolaus Bee, Bernhard Falk, and Elisabeth André. Simplified facial animation control utilizing novel input devices : A comparative study. In *Proceedings of the 14th international conference on Intelligent user interfaces*, pages 197–206. ACM, 2009. 167, 168, 171
- [190] Carl-Herman Hjortsjö. *Man’s face and mimic language*. Studen litteratur, 1969. 169
- [191] Paul Ekman and WV Friesen. Facial action coding system : A technique for the measurement of facial action. *Manual for the Facial Action Coding System*, 1978. 169
- [192] P Ekman, WV Friesen, and JC Hager. Facial action coding system : The manual on cd-rom. instructor’s guide. *Network Information Research Co, Salt Lake City*, 2002. 169, 170
- [193] Paul Ekman. Automatic nervous system activity distinguishes among emotion. *Science*, 1208 :221–230, 1983. 170
- [194] Irfan A. Essa and Alex Paul Pentland. Coding, analysis, interpretation, and recognition of facial expressions. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 19(7) :757–763, 1997. 170

- [195] Ying-Li Tian, Takeo Kanade, and Jeffrey F Cohn. Facial expression analysis. In *Handbook of face recognition*, pages 247–275. Springer, 2005. 170
- [196] Xing Zhang, Lijun Yin, Jeffrey F Cohn, Shaun Canavan, Michael Reale, Andy Horowitz, Peng Liu, and Jeffrey M Girard. Bp4d-spontaneous : a high-resolution spontaneous 3d dynamic facial expression database. *Image and Vision Computing*, 32(10) :692–706, 2014. 170
- [197] Jeffrey F Cohn, Adena J Zlochower, James Lien, and Takeo Kanade. Automated face analysis by feature point tracking has high concurrent validity with manual faces coding. *Psychophysiology*, 36(1) :35–43, 1999. 171, 172
- [198] Koray Balci. Xface : Mpeg-4 based open source toolkit for 3d facial animation. In *Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces*, pages 399–402. ACM, 2004. 171
- [199] Stefano Pasquariello and Catherine Pelachaud. Greta : A simple facial animation engine. In *Soft computing and industry*, pages 511–525. Springer, 2002. 171
- [200] Carroll Ellis Izard and Maya Weiss. *Maximally discriminative facial movement coding system*. University of Delaware, instructional resources Center, 1979. 171
- [201] Harriet Oster, Douglas Hegley, and Linda Nagel. Adult judgments and fine-grained analysis of infant facial expressions : Testing the validity of a priori coding formulas. *Developmental Psychology*, 28(6) :1115, 1992. 172
- [202] Andrew J Calder, Jill Keane, Tom Manly, Reiner Sprengelmeyer, Sophie Scott, Ian Nimmo-Smith, and Andrew W Young. Facial expression recognition across the adult life span. *Neuropsychologia*, 41(2) :195–202, 2003. 172, 173
- [203] Jesse Spencer-Smith, Heather Wild, Åse H Innes-Ker, James Townsend, Christy Duffy, Chad Edwards, Kristina Ervin, Nicole Merritt, and Jae Won Pair. Making faces : Creating three-dimensional parameterized models of facial expression. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 33(2) :115–123, 2001. 172
- [204] Lisa Wagels, Sina Radke, Katharina Sophia Goerlich, Ute Habel, and Mikhail Votinov. Exogenous testosterone decreases men’s personal distance in a social threat context. *Hormones and behavior*, 90 :75–83, 2017. 172
- [205] Susan Sullivan and Ted Ruffman. Emotion recognition deficits in the elderly. *International Journal of Neuroscience*, 114(3) :403–432, 2004. 173
- [206] Jeonghun Ku, Hee Jeong Jang, Kwang Uk Kim, Jae Hun Kim, Sung Hyouk Park, Jang Han Lee, Jae Jin Kim, In Y Kim, and Sun I Kim. Experimental results of affective valence and arousal to avatar’s facial expressions. *CyberPsychology & Behavior*, 8(5) :493–503, 2005. 173
- [207] Andrew Mao, Hossein Azari Soufiani, Yiling Chen, and David C Parkes. Capturing variation and uncertainty in human judgment. *arXiv preprint arXiv :1311.0251*, 2013. 173
- [208] Jean Goubault-Larrecq and INRIA Futurs projet SECSI. Une introduction aux capacités, aux jeux et aux prévisions. *LSV/UMR*, 8643, 2007. 179
- [209] Olivier Strauss. Quasi-continuous histograms. *Fuzzy sets and systems*, 160(17) :2442–2465, 2009. 179
- [210] Clinton D Kilts, Glenn Egan, Deborah A Gideon, Timothy D Ely, and John M Hoffman. Dissociable neural pathways are involved in the recognition of emotion in static and dynamic facial expressions. *Neuroimage*, 18(1) :156–168, 2003. 206
- [211] Wataru Sato, Takanori Kochiyama, Sakiko Yoshikawa, Eiichi Naito, and Michikazu Matsumura. Enhanced neural activity in response to dynamic facial expressions of emotion : an fmri study. *Cognitive Brain Research*, 20(1) :81–91, 2004. 206
- [212] Natalie K Harwood, Laura J Hall, and Alison J Shinkfield. Recognition of facial emotional expressions from moving and static displays by individuals with mental retardation. *American Journal on mental retardation*, 104(3) :270–278, 1999. 206

- [213] Lee J Cronbach. Coefficient alpha and the internal structure of tests. *psychometrika*, 16(3) :297–334, 1951. 211
- [214] Jean-Daniel Taupiac, Nancy Rodriguez, and Olivier Strauss. Immercity : Communiquer sur les réalités virtuelle, augmentée et mixte par leur utilisation. In *AFRV : Association Française de Réalité Virtuelle, Augmentée, Mixte et Interaction 3D*, 2016. 212
- [215] Jean-Daniel Taupiac, Nancy Rodriguez, and Olivier Strauss. Immercity : communicating about virtual and augmented realities. In *Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pages 1–2, 2017. 212
- [216] Jean-Daniel Taupiac, Nancy Rodriguez, and Olivier Strauss. Immercity : a curation content application in virtual and augmented reality. In *International Conference on Virtual, Augmented and Mixed Reality*, pages 223–234. Springer, 2018. 212
- [217] Katy Tcha-Tokey, Emilie Loup-Escande, Olivier Christmann, Gaëlle Canac, Fabien Farin, and Simon Richir. Vers un modèle de l’expérience utilisateur en environnement virtuel immersif : Une analyse de la littérature. 2015. 212
- [218] Julie Henderson, Paul Fishwick, Elinore Fresh, Franz Futterknecht, and B Hamilton. An immersive learning simulation environment for chinese culture. *Proceedings of the Interservice/Industry Training, Simulation, and Education Conferene (IITSEC), Orlando, Florida, paper*, 8344 :1–12, 2008. 244
- [219] Randall W Hill Jr, Jonathan Gratch, Stacy Marsella, Jeff Rickel, William R Swartout, and David R Traum. Virtual humans in the mission rehearsal exercise system. *Ki*, 17(4) :5, 2003. 244
- [220] Lydia Ould Ouali, Nicolas Sabouret, and Charles Rich. Un modèle pour prendre en compte les relations interpersonnelles dans les stratégies de dialogue. 252
- [221] Solomon Kullback. *Information theory and statistics*. Courier Corporation, 1997. 286, 304, 345
- [222] Maurice G Kendall. A new measure of rank correlation. *Biometrika*, 30(1/2) :81–93, 1938. 304

Index

- δ -comonotonie, 179
- Agents conversationnels incarnés, 114
- Apprenant, 27
- Apprentissage, 27
- Aptitude, 29, 96
- Blendshape, 167
- Capacité, 30
- Character Creator 3 (CC3), 175
- Communication d'équipe, 101, 108, 122
- Comonotonie, 179
- Compétence, 32
- Compétences sociales, 96, 146
- Comportement non-verbal, 101
- Comportements non-verbaux, 98, 107, 108, 114, 116
- Comportements verbaux, 98, 101, 107, 108, 116
- Confiance en soi, 57, 91, 126, 129, 148, 157
- Connaissance, 28
- Connaissances conditionnelles, 28
- Connaissances déclaratives, 28, 101
- Connaissances procédurales, 28
- Connaissances théoriques, 101
- Conscience de soi, 57, 85, 91, 127, 130, 148, 157
- Covariance, 149
- Cybermalaises, 51, 84, 90, 127, 129, 139
- Développement de compétences, 146, 156
- EAO FÉLIN, 69
- Engagement, 50, 54, 55, 82, 89, 133, 136
- Espace Interaction-Perception, 114
- Expression faciale, 164
- Expression faciale émotionnelle, 138, 164
- FÉLIN, 68
- Facial Action Coding System (FACS), 169
- Fidélité, 50, 54, 72, 75, 76, 82, 89, 133, 136
- Formation (professionnelle), 26
- Habilité, 30
- Habilités émettrices, 98, 100, 101, 108, 114, 145–147
- Habilités cognitives, 100
- Habilités décisionnelles, 98, 101, 105, 108
- Habilités réceptives, 98, 108
- Habilités sociales, 98
- HTC Vive, 42, 76, 130, 185, 192, 196
- Igroup Presence Questionnaire (IPQ), 54, 80, 82, 127, 129, 133, 135
- Immersion, 50
- Incohérences sensorimotrices, 52, 78, 139
- Interaction active interpersonnelle, 55, 133
- Interaction parasociale, 55, 133, 138
- Interaction passive interpersonnelle, 55, 133, 136, 138
- Interfaces à simulation de mouvement, 46
- Interfaces acoustiques, 45, 138
- Interfaces de localisation corporelle, 48
- Interfaces haptiques passives, 72, 73, 76, 89
- Interfaces motrices, 41, 46, 78
- Interfaces olfactives, 46
- Interfaces sensorielles, 41
- Interfaces sensorimotrices, 42, 48
- Interfaces tactiles, 45
- Interfaces visuelles, 42, 138, 146, 154, 156
- Magicien d'Oz, 116, 121, 138
- Maintien de compétences, 34, 156
- Matrice de variance-covariance, 149, 150
- Micro-compétences, 35
- Montée en compétences, 34
- Motivation extrinsèque, 56
- Motivation intrinsèque, 56, 84, 91
- Négociation, 104, 122
- Négociation client, 99
- p-value, 60
- Perception majoritaire, 178

- Pertinence de conception, 20, 52, 79, 82, 89
 Pertinence pédagogique, 20, 56, 79, 84, 90, 125, 148
 Plateformes directionnelles, 47, 78
 Présence générale, 54, 82, 89, 133
 Présence spatiale, 51, 54, 55, 82, 89, 133, 136
 Prise de parole en public, 108
- Réalisme, 50, 54, 82, 89, 117, 120, 133, 136
 Réalisme perceptif, 55
 Réalisme social, 55, 133
 Réalité Augmentée, 39
 Réalité Mixte, 40
 Réalité Virtuelle, 37
 Receiver Operating Characteristic (ROC), 197
 Richesse sociale, 55, 133
- Savoir, 31
 Savoir-être, 32, 97, 101, 102, 108, 143
 Savoir-faire, 31, 97
 Savoir-faire cognitifs, 34, 101, 105, 116
 Savoir-faire expérientiels, 33
 Savoir-faire procéduraux, 33, 67, 71, 112, 116
 Savoir-faire sociaux, 33, 99, 101, 108, 113, 143, 146
 Savoirs, 96, 101
 Savoirs procéduraux, 33, 99, 101
 Savoirs théoriques, 32, 99, 101
 Sensation de présence, 49, 73, 89, 127, 129, 133, 135, 136
 Sensation de présence sociale, 49, 114, 118, 127, 129, 133, 136, 137, 157
 Simulator Sickness Questionnaire (SSQ), 56, 127, 129, 139
 Sous-compétences, 34
 Spontanéité des Perceptions Correctes (SPC), 196, 197
 System Usability Scale (SUS), 53, 127, 129
- Tableau de contingence, 62, 64
 Taille de l'effet, 62
 Technologies immersives, 38
 Temple Presence Inventory (TPI), 55, 127, 129, 133
 Test de χ^2 , 62
 Test de Fisher, 63, 196
 Test de Kolmogorov-Smirnov, 139
 Test de Student (t-test), 60
 Test de Student apparié, 61
 Test de Wilcoxon apparié, 61
 Test de Wilcoxon-Mann-Whitney (U test), 60
- Utilisabilité, 53, 129, 131, 157
- Vallée de l'étrange, 117, 120
 Variables qualitatives, 59, 60, 62
 Variables quantitatives, 59, 60
 Variance, 149
 Vive Controller, 47, 76, 124
 Vive Tracker, 48, 124, 130

Annexes

Table des annexes

1 - Ressources liées à l'exploitation des questionnaires de cybermalaise SSQ	235
2 - FÉLIN VR, Questionnaire utilisateur	237
3 - FÉLIN VR, Questionnaire apprentissage	239
4 - Construction de l'espace Interaction-Perception	241
5 - Évaluation des travaux de l'état de l'art pour la formation aux compétences sociales, selon l'espace Interaction-Perception	243
6 - Holodeck Safran, dialogues du scénario Commerciaux	245
7 - Holodeck Safran, dialogues du scénario Managers	249
8 - Holodeck Safran, étude préliminaire	251
9 - Holodeck Safran, dialogues du scénario de choix d'un restaurant	255
10 - Holodeck Safran, scénario Commerciaux : 1 ^{ère} mise en situation	257
11 - Holodeck Safran, scénario Commerciaux : seconde mise en situation	259
12 - Holodeck Safran, grille d'évaluation métier Commerciaux	261
13 - Holodeck Safran, questionnaire de conscience de soi Commerciaux	263
14 - Holodeck Safran, scénario Managers : 1 ^{ère} mise en situation	265
15 - Holodeck Safran, scénario Managers : seconde mise en situation	267
16 - Holodeck Safran, scénario Managers : rôles des acteurs lors de la seconde mise en situation	269
17 - Holodeck Safran, scénario Commerciaux : questionnaire de confiance en soi pour la négociation client	271
18 - Holodeck Safran, scénario Managers : questionnaire de confiance en soi pour la communication d'équipe	273

19 - Holodeck Safran, questionnaire de conscience de soi managers	275
20 - Holodeck Safran, étude des temps de parole	277
21 - Seuils critiques du test de Kolmogorov-Smirnov	281
22 - Holodeck Safran, détail des troubles de la vision rapportés par les sujets	283
23 - Holodeck Safran, analyse de l'interprétation d'une grille d'évaluation par deux for- mateurs différents	285
24 - Code Matlab pour le seuillage de divergences de Kullback-Leibler	287
25 - Holodeck Safran, étude de l'évolution des évaluations	289
26 - Holodeck Safran, résultats détaillés des évolutions des évaluations pour les commer- ciaux	295
27 - Holodeck Safran, résultats détaillés des évolutions des ressentis de la prestation pour les managers	299
28 - Holodeck Safran, étude de la conscience de soi	303
29 - Holodeck Safran, résultats détaillés de la conscience de soi, pour les commerciaux	315
31 - Holodeck Safran, étude de la confiance en soi	323
32 - Perception des expressions faciales émotionnelles, étude préliminaire	327

33 - Holodeck Safran, expressions faciales émotionnelles dessinées avec Morph-3D et valeurs des blendshapes utilisés	337
34 - Comparaison des courbes SPC entre les personnages masculin et féminins (étude préliminaire avec Morph3D)	339
35 - Étude des variations inter-sexes dans la perception des expressions faciales émotionnelles	343
36 - Comparaison des courbes SPC selon le sexe des sujets et des personnages (étude préliminaire avec Morph3D)	359
37 - Correspondances entre AUs FACS et blendshapes CC3	363
38 - Ajustements des blendshapes CC3	367
39 - Résultats des dessins des expressions	369
40 - Exemple d'interpolations d'ordre supérieur à 1, pour la définition de niveaux d'intensité intermédiaires	375
41 - Ordre de positionnement des personnages du prototype de tri	377
42 - Exemple d'application de la méthodologie proposée pour la définition des niveaux d'intensité	379
43 - Valeurs des niveaux d'intensité établis à partir du prototype de tri	383
44 - Dessins des expressions à partir de la littérature	387
45 - Analyse des Action Units composant les expressions évaluées comme plus représentatives	389

1

**Ressources liées à l'exploitation des questionnaires
de cybermalaise SSQ**

TABLE 1.1: Calcul des scores SSQ [109] à partir des résultats des symptômes du questionnaire

Symptômes SSQ (0, 1, 2 ou 3)	Poids		
	N	O	D
Malaise général	1	1	
Fatigue		1	
Maux de tête		1	
Fatigue visuelle		1	
Troubles d'accommodation		1	1
Salivation accrue	1		
Transpiration	1		
Nausées	1		1
Difficultés de concentration	1	1	
Tête sous pression			1
Vision floue		1	1
Tête qui tourne (yeux ouverts)			1
Tête qui tourne (yeux fermés)			1
Vertiges			1
Estomac sensible	1		
Relents	1		
Score total (somme)	n	o	d
Scores des groupes de symptômes	$N = n \times 9.54$	$O = o \times 7.58$	$D = d \times 13.92$
Score total SSQ	$n + o + d \times 3.74$		

TABLE 1.2: Distribution par centiles et statistiques de l'échelle SSQ, produites par Kennedy et al. [109] à partir d'un échantillon de référence

Centiles	Valeurs sur l'échelle SSQ			
	N	O	D	Score total
40	0.0	0.0	0.0	0.0
45	0.0	0.0	0.0	3.7
50	0.0	7.6	0.0	3.7
55	0.0	7.6	0.0	3.7
60	0.0	7.6	0.0	7.5
65	9.5	7.6	0.0	7.5
70	9.5	15.2	0.0	11.2
75	9.5	15.2	0.0	15.0
80	9.5	22.7	13.9	22.5
85	19.7	27.7	13.9	22.5
90	28.6	30.3	27.8	30.0
95	38.2	45.5	41.7	44.9
96	38.2	45.5	41.7	44.9
97	47.7	53.1	55.7	48.7
98	57.2	53.1	55.7	56.2
99	66.8	60.7	83.5	75.9
Moyenne	7.7	10.6	6.4	9.8
Écart type	15.0	15.0	15.0	15.0
Minimum	0.0	0.0	0.0	0.0
Taille de l'échantillon	1101	1111	1109	1099

2

FÉLIN VR, Questionnaire utilisateur

Fusil

- 1 . Prendre en main le fusil a été facile : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 2* . J'ai trouvé la manipulation du fusil désagréable : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 3 . Manipuler le fusil m'a semblé réaliste : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*

Lunette

- 4 . J'ai facilement trouvé comment regarder par la lunette : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 5* . J'ai trouvé le fait de regarder par la lunette désagréable : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 6 . Regarder par la lunette m'a semblé réaliste : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*

Télécommande

- 7 . J'ai facilement trouvé les touches de la télécommande : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 8 . J'ai facilement trouvé comment utiliser la télécommande : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 9* . J'ai trouvé l'utilisation de la télécommande désagréable : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 10 . Utiliser la télécommande m'a semblé réaliste : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*

Menus

- 11 . Le menu m'a semblé suffisamment visible : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*

Méthode de déplacement

- 12 . J'ai facilement trouvé le moyen de me rendre sur la cible : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 13* . J'ai trouvé le moyen de me rendre sur la cible désagréable : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*

Cybermalaises : nausées

- 14 . J'ai ressenti des nausées (ou un mal des transports) lorsque j'étais allongé : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 15 . J'ai ressenti des nausées (ou un mal des transports) lorsque je me déplaçais autour du pas de tir : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 16 . J'ai ressenti des nausées (ou un mal des transports) lors du déplacement vers la cible : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 17 . Je ressens des nausées (ou un mal des transports) après l'expérience : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*

Cybermalaises : fatigue visuelle

- 18 . J'ai ressenti une fatigue visuelle pendant l'expérience : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 19 . Je ressens une fatigue visuelle après l'expérience : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*

* : Items négatifs

3

FÉLIN VR, Questionnaire apprentissage

Plaisir et intérêt

- 1 . Effectuer le réglage tireur a été vécu comme un plaisir : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 2 . Le support utilisé était attractif : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*

Motivation intrinsèque à répéter la procédure

- 3 . Je serais content d'effectuer le réglage à nouveau : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*

Confiance en soi

- 4 . Je me sens suffisamment à l'aise pour effectuer le réglage sur le champ de tir réel : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 5* . Je sens que j'aurais besoin de rejouer l'évaluation avant d'effectuer le réglage sur le champ de tir réel : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 6 . Je ressens que je suis plus compétent après l'expérience : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*

Conscience des erreurs

- 7 . J'estime avoir fait approximativement _ erreurs

Ressenti d'apprentissage

- 8 . Certaines étapes de la procédure n'étaient pas claires avant l'évaluation et ne le sont plus : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 9 . Certaines étapes de la procédure n'étaient pas claires avant l'évaluation et le sont moins : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 10 . Au cours de l'évaluation, j'ai réalisé que j'avais mal compris certaines phases de la procédure : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 11 . Certains parcours dans les menus n'étaient pas clairs avant l'évaluation et ne le sont plus : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 12 . Certains parcours dans les menus n'étaient pas clairs avant l'évaluation et le sont moins : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 13 . Au cours de l'évaluation, j'ai réalisé que j'avais mal compris certains parcours dans les menus : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 14 . Le calcul de la correction à apporter n'était pas clair avant l'évaluation et ne l'est plus : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 15 . Le calcul de la correction à apporter n'était pas clair avant l'évaluation et l'est moins : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*
- 16 . Au cours de l'évaluation, j'ai réalisé que j'avais mal compris le calcul de la correction : *pas du tout d'accord(0)-tout à fait d'accord(4)*

* : Items négatifs

4

Construction de l'espace Interaction-Perception

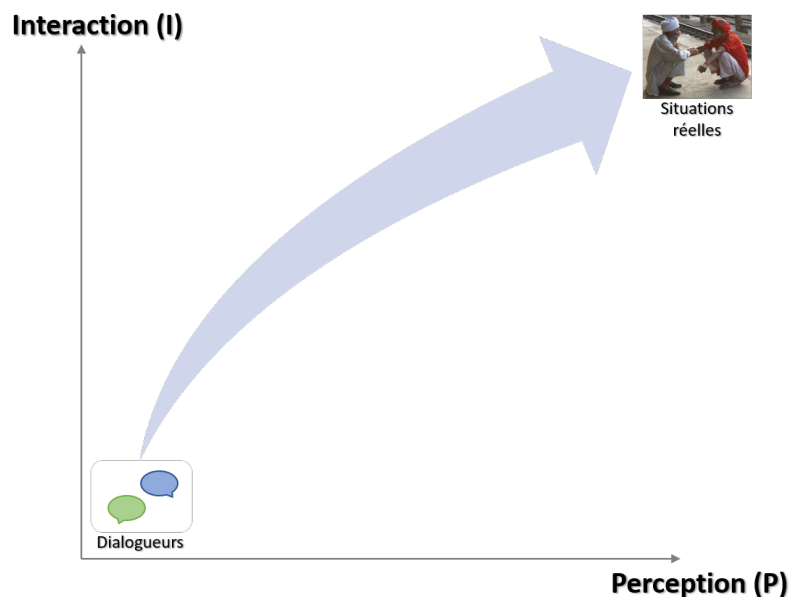


FIGURE 4.1: Espace Interaction-Perception pour l'évaluation d'outils utilisant des personnages virtuels via les technologies immersives

Afin de situer les travaux utilisant ces technologies immersives pour interagir avec des agents conversationnels incarnés, nous proposons de les évaluer selon deux dimensions :

- une dimension perceptive (P), relevant du degré de perception apporté par l'interface visuelle utilisée pour diffuser l'environnement virtuel ou mixte. Nous choisissons de la représenter par une échelle à 4 degrés de perception du personnage virtuel et de son environnement, ayant pour valeurs :
 - (0) Faible, e.g. : dialogueurs, messageries instantanées, etc.
 - (1) Basse, e.g. : écran d'ordinateur, tablettes, smartphones, etc.
 - (2) Moyenne, e.g. : grand écran, écran projeté, etc.
 - (3) Importante, e.g. : visiocasques, salles immersives, environnement mixte, etc.
- une dimension interactive (I), propre aux fonctionnalités d'interaction sociale permises par l'outil. Nous proposons de décomposer cette dimension en une échelle de 0 à 12, la moitié étant propre à l'interaction sociale côté utilisateur, et l'autre à celle côté personnage virtuel. Ainsi, cette échelle est composée par un agrégat des éléments suivantes :
 - une sous-échelle d'interaction à 4 degrés pour le moyen avec lequel l'utilisateur dialogue (DU), ayant pour valeurs :
 - (0) lorsqu'il passe par une sélection textuelle lui étant proposée
 - (1) lorsqu'il doit entrer un texte pour dialoguer
 - (2) lorsqu'il sélectionne oralement des phrases proposées en les prononçant
 - (3) lorsqu'il énonce oralement des phrases qu'il compose, reconnues par le système, ou par un autre utilisateur pilotant le personnage virtuel
 - trois valeurs pour la prise en compte de la communication non verbale par le personnage virtuel, i.e. lorsque le système (ou quelqu'un le pilotant) détecte les comportements et que le personnage en tient compte :
 - (1) si la gestuelle, les mouvements et la posture de l'utilisateur sont pris en compte (NVUG)
 - (1) si le regard de l'utilisateur sont pris en compte (NVUR)
 - (1) si les expressions faciales de l'utilisateur sont prises en compte (NVUE)
 - six valeurs pour le degré de multimodalité de la communication de l'agent conversationnel incarné :
 - (1) si le personnage dialogue oralement (DA)
 - (1) si le personnage dialogue automatiquement (0 s'il est piloté) (DAA)
 - (1) si le personnage dialogue oralement via une voix pré-enregistrée (non-synthétique) (DAV)
 - (1) si le personnage s'exprime via sa gestuelle, ses mouvements, et sa posture (NVAG)
 - (1) si le personnage s'exprime via son regard (NVAR)
 - (1) si le personnage s'exprime via des expressions faciales (NVAE)

Ainsi, nous cherchons à construire un espace bidimensionnel Interaction-Perception, permettant de situer les travaux utilisant des personnages virtuels sur un espace allant par exemple, des dialogueurs (chatbots) aux situations réelles (Figure 4.1).

Nous proposons donc de classer sur cet espace les différents travaux relevés dans la littérature, à partir des informations communiquées par les auteurs. Dans le cas d'informations manquantes sur certains aspects (e.g. utilisation de voix synthétiques, utilisation du non-verbal, etc.), nous choisirons de ne pas ajouter la valeur concernée.

**Évaluation des travaux de l'état de l'art pour la
formation aux compétences sociales, selon l'espace
Interaction-Perception**

TABLE 5.1: Évaluation des travaux de la littérature selon les critères de l'espace Interaction-Perception

Auteurs	P	I (Interaction)										
		Total	DU	NVUG	NVUR	NVUE	DA	DAA	DAV	NVAG	NVAR	NVAE
Morton et al. [160]	1	9	3				1	1	1	1	1	1
Johnson et al [134]	1	6	3	1			1	1				
Sykes et al. [161, 162]	1	5	3				1	1				
Henderson et al. [218, 162]	1	1						1				
Babu et al. [50]	2	9	3	1	1		1	1		1	1	
Cordar et al. [51]	3	7	3	1			1	0	0	1	1	
Mathieu et al. [165]	1	2	0	0	0	0	0	1	0	1		
Pertaub et al. [46, 47]	3	8	3				1	0	1	1	1	1
Chollet et al. [41, 42, 43]	3	9	3	1	1	1	0	0	0	1	1	1
Anderson et al. [39]	1	10	3	1	1	1	1	1		1		1
Hoque et al. [40]	2	10	3	1		1	1	1	0	1	1	1
Lane et al. [38]	1	3	0	0	0	0	1	1		1		
Emonts et al. [163]	1	7	3				1	1		1		1
Kron et al. [48]	1	6	1				1	1		1	1	1
Ochs et al. [49]	3	10	3	1	1	1	1	0		1	1	1
Hays et al. [135]	3	6	2				1	1		1	0	1
Huguet et al. [159]	3	3	1					1		1		
Devault et al. [36]	1	7	3				1	0	0	1	1	1
Traum et al. [37, 12]	2	7	3				1	1		1		1
Hill et al. [219]	2	8	3				1	1	0	1	1	1
Frank et al. [136]	1	8	3	0			1	1		1	1	1
Kenny et al. [12]	3	7	3				1	1		1		1

Holodeck Safran, dialogues du scénario Commerciaux

Étape	Propos	Émotions Neutre, Content, Mécontent, En Colère, Surprise, Sceptique
Proposals	<ul style="list-style-type: none"> - How can you ensure we will be delivered on regular paterns ? - I am not confident, your action does not seem secured. - This as a good idea. - Can we start conf call next week ? - That can be a solution, we need to think about it. - It is a problem. I need more visibility. - Yes! - I understand. - No! - This is not enough. - Please. - Right! - I dont know. 	<ul style="list-style-type: none"> N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc
Conclusion	<ul style="list-style-type: none"> - This meeting was constructive, I think we found ways of improving our critical situation. - I agree on this action plan. - I do not agree on this action plan, it is not precised enough. - Can you provide us a proposal before end of the week ? - What about next meeting date ? - Thank you, I think we can close the meeting now. - Good bye! - See you soon! - I'm not really confident. - Yes! - No! - Right! - I dont know. 	<ul style="list-style-type: none"> N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc

7

Holodeck Safran, dialogues du scénario Managers

Étape	Propos	Émotions Neutre, Content, Mécontent, En Colère, Surprise, Sceptique
Introduction	<ul style="list-style-type: none"> - Oui ! - Non ! - Je ne sais pas. - Peut-on avoir la présence d'un représentant syndical ? - Encore une mauvaise nouvelle ! - Enfin une com' ! - Y'a des rumeurs qui courent, ça y est, la sanction est tombée ? - On aura le droit de poser des questions ? - Ça a l'air sérieux, t'as pas le sourire ! - Laissez-le s'exprimer ! 	<ul style="list-style-type: none"> N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc M Sc Sc M Su Sc N
Contexte	<ul style="list-style-type: none"> - Oui ! - Non ! - Je ne sais pas. - OK, donc voilà, tout part au Brésil ! - On peut demander une mobilité ? - Combien de suppression d'emploi à Tarnos ? - Vous fermez les ateliers de Tarnos ! D'abord la Prod', maintenant la Répa ! 	<ul style="list-style-type: none"> N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc M Su Sc EC
Annonce de la décision	<ul style="list-style-type: none"> - Oui ! - Non ! - Je ne sais pas. - Combien de suppressions d'emploi à Tarnos ? - Super ! Y'aura un plan de retraite anticipée ? - Pourquoi ce n'est pas l'activité qui vient à Tarnos ? - Et qui va former les brésiliens ? - Moi, je refuse de former des gens qui nous piquent notre travail ! - Le management est-il aussi concerné par la décision ? - Est-ce qu'il y aura un plan de reclassement ? - Combien va coûter le transfert d'activité ? - On va pas se laisser faire ! On va se mettre en grève ! - Quelle est ta position ? - Est-ce que tu étais au courant ? - Est-ce que tu nous a défendu ? - Comment ? - Stop ! C'est insupportable ! On quitte cette réunion ! - Ça fait des années qu'on est les meilleurs ! Voilà comment on est remerciés ! 	<ul style="list-style-type: none"> N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc Sc C Sc M EC Sc Su Sc EC M M M EC EC
La suite	<ul style="list-style-type: none"> - Oui ! - Non ! - Je ne sais pas. - On va pas se laisser faire ! On va se mettre en grève ! - Ça ne sert plus à rien de se battre ! - En douze mois, on aura pas le temps de retrouver un travail ! - On ferme aussi la prod', y'aura plus de boulot pour les ouvriers à Tarnos ! - On comprend la décision, mais on est pas d'accord ! - Y'aura-t'il des nouveaux moteurs à réparer à Tarnos ? - Quels sont les autres secteurs impactés ? - Est-il prévu un accompagnement psychologique ? - Faudra pas nous demander des heures sup' ! 	<ul style="list-style-type: none"> N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc N,C,M,EC,Su,Sc EC M M EC N C,Sc N Sc M



Holodeck Safran, étude préliminaire



FIGURE 8.1: Visiocasque HTC VIVE, équipé d'un serre-tête *Deluxe Audio Strap* (source : <https://www.vive.com/eu/vive-deluxe-audio-strap/>)

A l'issue de la réalisation du prototype, nous avons effectué une étude préliminaire afin d'observer si le système était suffisamment utilisable, et pouvoir entreprendre des expérimentations sur des utilisateurs finaux. Nous avons notamment cherché à évaluer si les utilisateurs se sentaient suffisamment présents au sein de l'environnement virtuel, ainsi que socialement face aux personnages virtuels.

I Processus expérimental

En s'inspirant des travaux de Ouali et al. [220] qui utilisent un scénario simple de négociation, nous avons repris la scène du scénario commerciaux (Figure 4.25) en l'appliquant à celui du choix d'un restaurant¹, face à un seul personnage virtuel. Afin d'éviter les effets liés au sexe du personnage virtuel que nous avons relevé lors de l'analyse de la littérature², les sujets étaient confrontés à un personnage du même sexe.

Le scénario de négociation du choix d'un restaurant, simple et facilement appropriable, a permis de tester le prototype sur 54 collaborateurs de Capgemini. Les sujets étaient composés à 63% d'hommes pour 37% de femmes et leur moyenne d'âge était de 36 ans (± 10). 74.1% d'entre eux avait déjà eu une première expérience en Réalité Virtuelle auparavant.

Lors de la mise en situation, les sujets utilisaient un visiocasque HTC VIVE, équipé d'un serre-tête de fixation intégrant un casque stéréophonique (Figure 8.1). Avant de les équiper, l'écart inter-pupillaire des sujets était mesuré et le visiocasque était réglé en fonction de leur morphologie.

À l'issue de leur négociation en Réalité Virtuelle, les sujets devaient remplir un questionnaire de présence³ (IPQ [105]) ainsi qu'un questionnaire de présence sociale (Bailenson et al. [124]).

Pour finir, au cours d'un entretien ouvert, les sujets étaient invités à échanger librement sur leur ressenti. L'entretien débutait par la même question, leur demandant de communiquer tout le feedback qu'ils jugeraient pertinent au sujet de l'expérience qu'ils venaient de vivre. Les retours ont été notés et traités manuellement.

Enfin, pour limiter l'impact de l'interface Magicien d'Oz sur la présence sociale, il est important de noter que l'expérimentateur était entraîné et que les sujets n'étaient pas informés que les personnages virtuels étaient pilotés à distance.

II Résultats

Les questionnaires de présence ont permis de mettre en avant les résultats présents en Figure 8.2.

Questionnaire de présence IPQ

Pour exploiter les résultats du questionnaire IPQ, les auteurs proposent de calculer les moyennes de chaque groupe d'items composant le questionnaire. Nous avons souhaité respecter la même démarche en reprenant leurs travaux.

Les résultats obtenus (Figure 8.2, gauche) nous ont semblé satisfaisants à ce stade de la réalisation du prototype, excepté pour le ressenti du réalisme de l'environnement virtuel ("*Experienced Realism*", $Me = 2.75$).

1. Les propos disponibles pour le scénario de choix d'un restaurant sont mis à disposition en Annexe 9 (p.255)

2. Voir paragraphe *Variabilité inter-sexes* (p.118)

3. Voir Chapitre 2 *Fondements*, p.54

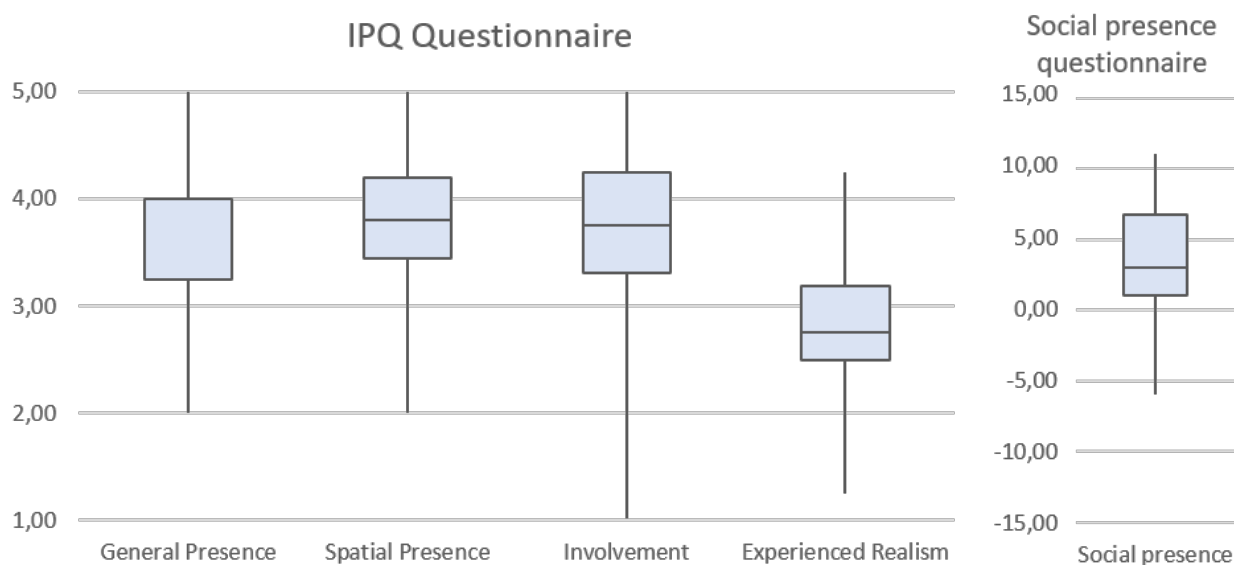


FIGURE 8.2: Holodeck Safran, tests utilisateurs : résultats des questionnaires de présence

Présence sociale

Bailenson et al. proposent d'établir un score de présence sociale en additionnant les réponses des différents items de leur questionnaire de présence sociale. Là encore, bien que cette démarche établissant des données quantitatives à partir de données qualitatives puisse prêter à discussion, nous avons choisi de nous inscrire dans la même démarche que les auteurs. Nous avons donc calculé le même score de présence sociale pour chaque sujet.

Les résultats obtenus (Figure 8.2, droite) semblaient mitigés à l'issue de la réalisation du prototype ($Me = 3.00$).

Enfin, au cours de l'entretien, une grande partie des utilisateurs (42.6%) ont souligné les limites du scénario proposé : réponses limitées, problèmes de cohérence, répétitions, etc. D'autres critiques concernaient également les animations gestuelles lors de la prise de parole (24.1%) et l'utilisation du regard (11.1%).

III Discussions

Les résultats du questionnaire de présence IPQ ont révélé une faible notation du réalisme de l'environnement virtuel. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que l'environnement a été volontairement rendu dans un style simpliste. Les entretiens tendent à confirmer cette hypothèse. En effet, lorsqu'ils ont été invité à s'exprimer librement sur leur expérience, certains utilisateurs (7.4%) ont souligné le rendu simpliste de l'environnement (couleurs, texture, éclairage, etc.).

Nous avons cependant pris le parti de conserver le rendu simpliste de la scène. L'objectif est d'éviter ainsi le plus possible que l'apprenant ne soit trop accaparé par l'environnement, au dépend de l'interaction avec les personnages virtuels. Cependant, des études supplémentaires concernant l'impact du niveau de réalisme de l'environnement sur l'interaction sociale seraient nécessaires afin de confirmer cette décision.

Les résultats obtenus par le questionnaire de présence sociale se sont montrés mitigés à l'issue de la réalisation du prototype.

Les entretiens ont permis de souligner des points d'amélioration ayant pu impacter la présence sociale de manière négative. La nécessité de l'amélioration du comportement non verbal a notamment été soulignée.

Les animations gestuelles sont par exemple lancées aléatoirement lorsque le personnage virtuel prend la parole. Il sera important d'améliorer ce système dans les travaux futur, afin que les gestes soient liés aux propos du personnage virtuel. De même, le personnage ne suivait pas l'utilisateur des yeux et pouvait de temps en temps diriger aléatoirement son regard ailleurs. Là encore, il est envisagé d'améliorer ce comportement, de sorte à tendre vers une communication multimodale accrue des personnages virtuels.

Le questionnaire utilisé cherche à évaluer la sensation de présence selon 5 items. Il est possible que la vision qu'il apporte sur la sensation de présence manque de finesse. Dans la poursuite des travaux, nous chercherons donc à vérifier ces résultats, en utilisant un questionnaire plus développé (e.g. questionnaire TPI [101, 125]) lors de nouvelles expérimentations.

Enfin, l'utilisation de l'interface "magicien d'Oz" pourrait également avoir impacté la présence sociale. Néanmoins, les entretiens ont révélé un impact mitigé. Si 24.1% des utilisateurs ont souligné un ressenti du "magicien d'Oz" par le temps de réaction du personnage, 14.8% d'entre eux ont en revanche exprimé que leur interlocuteur virtuel semblait les comprendre.

IV Limites des résultats

Certains éléments peuvent cependant avoir impacté ces résultats.

Les tests utilisateur ont eu lieu dans un openspace, ce qui peut avoir impacté négativement les sensations de présence. De plus, il est important de noter que l'ensemble des sujets était majoritairement composé d'ingénieurs logiciel. Une grande partie d'entre eux (55.6%) avait déjà eu connaissance de ces travaux, que ce soit par le biais de discussions (51.9%), d'une vidéo de présentation des travaux (13%) ou encore pour avoir déjà essayé le prototype au cours des développements (7.4%).

V Conclusions

Nous avons effectué des tests utilisateur sur un scénario basique afin d'évaluer le prototype à l'issue de sa réalisation. Les résultats se sont montrés encourageants, les sujets s'étant senti présent dans l'environnement virtuel. La présence sociale face aux personnages virtuels a en revanche montré des résultats plus mitigés.

Du fait des résultats, nous avons choisi de conserver le prototype en l'état afin qu'il fasse l'objet d'expérimentations sur d'autres scénarios, chez des utilisateurs finaux, managers et commerciaux.

Enfin, ces tests ont également permis de relever des pistes d'amélioration à prendre en compte dans de travaux futurs (animation gestuelles, regard).

Holodeck Safran, dialogues du scénario de choix d'un restaurant

Étape	Propos	Émotions Neutre, Content, Mécontent, En Colère, Surprise, Sceptique
Négociation	- Bonjour, je suis prêt(e) à discuter avec vous au sujet du choix du restaurant. Vous pouvez commencer.	N,C,M,EC,Su,Sc
	- Oui!	N,C,M,EC,Su,Sc
	- Non!	N,C,M,EC,Su,Sc
	- Merci!	N,C,M,EC,Su,Sc
	- Je ne sais pas.	N,C,M,EC,Su,Sc
	- Je n'en ai aucune idée...	N,C,M,EC,Su,Sc
	- D'accord!	N,C,M,EC,Su,Sc
	- Entendu, allons-y!	N,C,M,EC,Su,Sc
	- Avez-vous un lieu en particulier à suggérer?	N,C,M,EC,Su,Sc
	- Je n'aime pas particulièrement ce restaurant...	N,C,M,EC,Su,Sc
	- Je vous avoue que je n'aime pas vraiment ce type de cuisine...	N,C,M,EC,Su,Sc
	- Je trouve que ce restaurant est trop cher...	N,C,M,EC,Su,Sc
	- Cela m'embête un peu... J'ai déjà mangé dans ce restaurant cette semaine...	N,C,M,EC,Su,Sc
	- J'ai déjà mangé ce type de cuisine cette semaine, j'aimerais éviter...	N,C,M,EC,Su,Sc
	- J'aime bien manger chinois, italien ou indien.	N,C,M,EC,Su,Sc
- Désolé, je ne connais pas de restaurants ici...	N,C,M,EC,Su,Sc	
- Merci, ce fut un plaisir d'échanger avec vous. L'expérimentation est maintenant terminée. Vous pouvez enlever votre casque. Au revoir.	N,C,M,EC,Su,Sc	

10

**Holodeck Safran, scénario Commerciaux : 1^{ère} mise
en situation**

YOUR CUSTOMER :

- Ministry of Defence of UK
- Main activities : military
- Fleet : [XXX] engines, [type de contrat]
- War room meeting asked by Customer due to their OPEX (Operation externe) in a foreign country

MISSION :

- You know customer is not satisfied and customer is on a critical situation due to their OPEX
- Safran did not reach objectives in terms of deliveries of serviceable engines and availability objectives are not reached
- You know customer will ask you to reduce Turn Around Time on repair engines however Safran repair line cannot do better, for instance
- You will have to explain the reason of delay and reassure customer

11

**Holodeck Safran, scénario Commerciaux : seconde
mise en situation**

YOUR CUSTOMER :

- Civil customer located in Vietnam
- Activity is mainly composed by charter & tourism
- Small fleet of 6 aircrafts
- Flight hours around 300H per year and per engine
- Customer returned past year an engine for Foreign Object Damage (300K euros)to Safran Repair Center and he spent a huge expense for this Overhaul

MISSION :

- You already know this customer because Safran ensures maintenance of its engines (times and material.
- Customer required this meeting with Safran
- Customer needs to improve availability of its engines and wants to avoid pick of costs

12

**Holodeck Safran, grille d'évaluation métier
Commerciaux**

		-2	-1	0	1	2	3	4
Introduction open meeting	Présentation, échanges Climat de confiance Souriant Avenant Ouvert Voix audible Voix ferme							
Meeting start	Prise en compte de l'ordre du jour Laisse parler le client Écoute, est attentif Regard centré sur le client Demande de compléments d'information Reformule Prend le temps de répondre Ton modéré Attitude conciliante Entrain							
Discussion	Attitude de leadership Puissance, force de conviction Maîtrise de la situation Flexible Confiance en soi Rassurer le client Donner suffisamment d'infos au client Gestion de l'objection Reformuler Proposer des solutions Connaissance du sujet Professionnalisme Clarté des informations Être transparent Attitude positive Gestion du stress Maîtrise linguistique (Anglais) Rassure Donne de la perspective Maîtrise de la situation Usage de stratégie Proposition de plans d'actions Donne suffisamment d'infos au client Interactivité Faire adhérer, valider la proposition au client Gestion de l'objection Attitude positive Être transparent							
Meeting closure	Résumer les points clés Plan d'action validé par le client Fixer la prochaine réunion Terminer sur un climat de confiance Attitude ouverte et positive							

13

**Holodeck Safran, questionnaire de conscience de soi
Commerciaux**

En cherchant à être le plus objectif possible, veuillez donner votre ressenti quant à [votre prestation]/[la prestation de l'apprenant] lors de la mise en situation :

ATTITUDE

- 1- [Je me suis][Il/Elle s'est] correctement présenté(e) au client :
pas du tout(0)-pas assez(1)-de manière perfectible(2)-totalement(3)
- 2- [J'ai][Il/Elle a] instauré un climat de confiance :
pas du tout(0)-pas assez(1)-de manière perfectible(2)-totalement(3)
- 3- [Je me suis][Il/Elle s'est] montré(e) avenant(e) et ouvert(e) :
pas du tout(0)-pas assez(1)-de manière perfectible(2)-totalement(3)
- 4- [Je suis][Il/Elle est] resté(e) calme et posé(e) :
pas du tout(0)-pas assez(1)-de manière perfectible(2)-totalement(3)
- 5- [Je me suis][Il/Elle s'est] montré(e) compréhensif(ve) :
pas du tout(0)-pas assez(1)-de manière perfectible(2)-totalement(3)
- 6- [Je me suis][Il/Elle s'est] montré(e) rassurant(e) :
pas du tout(0)-pas assez(1)-de manière perfectible(2)-totalement(3)
- 7- [Je me suis][Il/Elle s'est] montré(e) rassurant(e) :
pas du tout(0)-pas assez(1)-de manière perfectible(2)-totalement(3)
- 8- [Je me suis][Il/Elle s'est] montré(e) flexibl(e) :
pas du tout(0)-pas assez(1)-de manière perfectible(2)-totalement(3)

SUJET

- 9- [J'ai][Il/Elle a] correctement pris en compte l'ordre du jour : *pas du tout(0)-pas assez(1)-de manière perfectible(2)-totalement(3)*
- 10- [J'ai][Il/Elle a] demandé des informations complémentaires : *pas du tout(0)-pas assez(1)-de manière perfectible(2)-totalement(3)*
- 11- [J'ai][Il/Elle a] correctement reformulé le sujet et les problématiques : *pas du tout(0)-pas assez(1)-de manière perfectible(2)-totalement(3)*
- 12- [J'ai][Il/Elle a] proposé des solutions, des plans d'action et des perspectives au client : *pas du tout(0)-pas assez(1)-de manière perfectible(2)-totalement(3)*
- 13- [J'ai][Il/Elle a] donné suffisamment d'informations claires au client : *pas du tout(0)-pas assez(1)-de manière perfectible(2)-totalement(3)*

EXPRESSION

- 14- [Ma][Sa] voix était audible et posée : *pas du tout(0)-pas assez(1)-de manière perfectible(2)-totalement(3)*
- 15- Le ton de [ma][sa] voix était adéquat : *pas du tout(0)-pas assez(1)-de manière perfectible(2)-totalement(3)*
- 16- [Mon][Son] utilisation de l'Anglais était correcte : *pas du tout(0)-pas assez(1)-de manière perfectible(2)-totalement(3)*
- 17- [Je me suis][Il/Elle s'est] montré(e) souriant(e) : *pas du tout(0)-pas assez(1)-de manière perfectible(2)-totalement(3)*
- 18- [J'ai][Il/Elle a] fait preuve d'écoute active : *pas du tout(0)-pas assez(1)-de manière perfectible(2)-totalement(3)*
- 19- [Mon][Son] regard était centré sur le client : *pas du tout(0)-pas assez(1)-de manière perfectible(2)-totalement(3)*
- 20- [Ma][Sa] posture physique était correcte : *pas du tout(0)-pas assez(1)-de manière perfectible(2)-totalement(3)*

14

Holodeck Safran, scénario Managers : 1^{ère} mise en situation

Scenario :

- Safran Helicopter Engines doit faire face à baisse d'activité globale et opère un changement de répartition de charges entre sites Safran Helicopter Engines.
- La ligne de réparation [moteur] de Tarnos doit être stoppée et l'activité transférée sur le site du Brésil malgré de bons résultats.
- Une annonce qui est totalement inattendue. Le personnel impacté sera réparti sur d'autres lignes de réparation sur Tarnos.

Vous allez devoir réaliser une intervention afin d'annoncer une décision société difficile avec impact direct sur l'activité de l'équipe.

L'enjeu est de nourrir l'intervention des arguments à même d'illustrer et expliquer la décision société.

15

**Holodeck Safran, scénario Managers : seconde mise
en situation**

Scenario :

L'activité Safran Helicopter Engines est en baisse. L'entreprise doit baisser ses coûts, notamment en capacité interne. L'actu 3 du budget tombe avec des baisses d'effectif sur plusieurs secteurs.

Chef d'un groupe Méthodes de 4 personnes, vous allez devoir faire un -1 sur votre effectif, malgré une activité forte en raison des nouveaux moteurs et donc de nombreuses gammes à développer.

Il y a également quelques projets d'innovation en cours.

Vous aurez donc 4 mois pour acter cette mobilité en interne dans des secteurs qui recrutent ou en externe (création d'un projet personnel).

Vous allez devoir annoncer la nouvelle à votre équipe, l'argumenter et convaincre de la justesse de la décision. Annoncer également les prochaines étapes.

Holodeck Safran, scénario Managers : rôles des acteurs lors de la seconde mise en situation

Rôles :

— L'expérimenté :

- *Expérience de l'acteur :* oui

- *Description du rôle :*

Ancien de l'équipe, il a connu plusieurs réorganisations et autres crises. Il n'est pas surpris et un peu fataliste car en tant que expert, il ne se sent pas menacé.

- *Phrases/Réponses type à prononcer :*

1. "Encore une baisse d'effectif et il faudra recruter dans un an quand on sera coincé!"
2. "Vous ne connaissez pas le travail pour prendre ce genre de décisions!"
3. "Faudra pas compter sur des heures sup'!"
4. "Je comprends la décision, mais je ne suis pas d'accord."

— L'apprenti :

- *Expérience de l'acteur :* non

- *Description du rôle :*

Dernier arrivé dans l'équipe, il se sent tout de suite visé par l'annonce. Pilote de projets, il essaie de se mettre en avant pour être conservé en se montrant plus indispensable que les autres. Une attitude peu appréciée par *L'engagé*.

- *Phrases/Réponses type à prononcer :*

1. "Je suis le seul à maîtriser les nouveaux outils, vous feriez du surplace sans moi."
2. "Je suis tout à fait capable de prendre [le nouveau moteur]"

— L'opportuniste :

- *Expérience de l'acteur :* oui

- *Description du rôle :*

Ayant déjà connu plusieurs postes dans sa carrière, il est le moins réfractaire à bouger. Méthodiste sur [le nouveau moteur], *L'expérimenté* et *L'engagé* sont inquiets pour la reprise de son travail (capacités et compétences pour prendre le relais). Il essaie de négocier une grosse rallonge pour faciliter le travail de son manager.

- *Phrases/Réponses type à prononcer :*

1. "Donnez moi 40 points et je bouge direct!"
2. "Je vous souhaite bon courage pour prendre la suite sur [le nouveau moteur]"

— L'engagé :

- *Expérience de l'acteur :* oui

- *Description du rôle :*

Engagé dans une organisation syndicale ouvrière, il ne comprend pas la décision. Surtout, il n'a pas confiance en son manager pour sa gestion du sujet et sa capacité à les défendre dans les plus hautes sphères de décision.

- *Phrases/Réponses type à prononcer :*

1. "Tu n'y connais rien au travail!"
2. "Qu'as-tu fait pour nous défendre?"
3. "On va solliciter l'organisation syndicale pour nous défendre, on va pas se laisser faire!"
4. "À qui vas-tu donner [le nouveau moteur]?"

17

**Holodeck Safran, scénario Commerciaux :
questionnaire de confiance en soi pour la négociation
client**

En imaginant votre prochaine situation de négociation face à un client, veuillez évaluer votre ressenti rapidement, sans trop y réfléchir, mais le plus objectivement possible. C'est votre première impression qui nous intéresse.

Rappel : Ces informations seront utilisées de manière anonyme et ne pourront être utilisées à d'autres fins qu'expérimentales.

- 1* . Si la négociation traite de MRO-processus de réparation, je crains d'éprouver des difficultés : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 2* . Si la négociation traite du Service SBH, je pourrais vivre des situations délicates : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 3 . J'attends avec impatience ma prochaine situation de négociation : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 4 . J'arriverais aisément à montrer au client que je l'écoute : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 5* . Mes mains risquent d'avoir tendance à trembler lorsque je serais face au client : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 6* . Je crains de ne pas trouver mes mots devant le client : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 7* . Je répondrais du tac au tac au client : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 8 . Je prendrais plaisir à m'exprimer par ma voix et mes gestes : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 9 . Je reformulerais les demandes du client : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 10 . Je me sentirais crédible au cours de la négociation : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 11* . Lorsque je préparerais la réunion, je ressentirais de l'anxiété : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 12 . À l'issue de la situation de négociation, je ressentirais avoir eu une expérience plaisante : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 13* . Je ne prendrais pas plaisir à m'exprimer par ma voix et mes gestes : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 14* . Mes pensées risquent de devenir confuses et de se mélanger lorsque je serais face au client : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 15 . Je ne ressentirais pas de peur à être face au client : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 16 . Bien que je sois nerveux(se) avant la situation de négociation, j'oublierais rapidement mes peurs et apprécierais la situation : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 17* . J'aurais du mal à sourire instinctivement au client : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 18* . J'éprouverais quelques difficultés pour instaurer un climat de confiance avec le client : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 19* . Je risque de ressentir du stress au cours de la négociation : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 20 . J'imagine vivre la situation de négociation en totale confiance : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 21 . Je me sentirais en pleine possession de mes moyens lors de l'échange : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 22* . Je préférerais avoir des notes préalablement préparées sur lesquelles m'appuyer si besoin : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 23 . Je prendrais plaisir à observer les réactions des clients lors des échanges : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 24* . Même si je vis couramment des situations similaires dans la vie de tous les jours, je serais embarrassé(e) face au client : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 25 . Je me sentirais relaxé(e) et confortable lors des échanges : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 26 . Bien que je n'aime pas ce genre de situations, je ne les redoute pas particulièrement : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 27* . J'éviterais toujours les échanges face à un client si possible : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 28* . Je risque d'éviter de regarder le client lors des échanges : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 29* . Je risque d'être insatisfait(e) de ma prestation après avoir vécu la situation : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 30 . J'apprécierais préparer cet échange : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 31 . Mon esprit sera clair face aux clients : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 32 . Je serais assez à l'aise : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 33* . Je risque de transpirer et trembler avant l'échange : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 34* . Je trouverais ma posture forcée et contre nature : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 35* . Je me sentirais inquiet(e) et tendu(e) tout au long des échanges : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 36 . Je trouve la perspective de cette situation légèrement plaisante : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 37* . Je risque de ne pas me sentir crédible au cours de la négociation : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 38* . Je répondrais au client sans reformuler ses demandes : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 39* . Il sera difficile pour moi de chercher dans mon esprit les mots justes pour exprimer mes pensées : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 40 . Je sourirais instinctivement au client : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 41 . J'arriverais facilement à instaurer un climat de confiance avec le client : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 42 . Je ne ressentirais aucun stress au cours de la négociation : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 43* . Je suis terrifié(e) à l'idée de vivre cette situation face au client : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 44 . J'arriverais à prendre le temps de la réflexion avant de répondre au client : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 45* . Je risque d'avoir de légères absences d'attention nuisant à l'écoute que j'accorde au client : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 46* . J'aurais la sensation d'être méfiant(e) face au client : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 47 . Je me sens apte à gérer la situation si elle traite de MRO-processus de réparation : *pas du tout(0)-totalelement(4)*
- 48 . Je me sens capable de gérer la situation si elle traite du Service SBH : *pas du tout(0)-totalelement(4)*

* : Items négatifs

Holodeck Safran, scénario Managers : questionnaire de confiance en soi pour la communication d'équipe

En imaginant votre prochaine situation de communication délicate, veuillez évaluer votre ressenti rapidement, sans trop y réfléchir, mais le plus objectivement possible. C'est votre première impression qui nous intéresse.

Rappel : Ces informations seront utilisées de manière anonyme et ne pourront être utilisées à d'autres fins qu'expérimentales.

- 1 . J'attends avec impatience ma prochaine communication : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 2* . Dans certaines situations, je risque d'avoir du mal à maîtriser ma respiration : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 3* . Mes mains risquent d'avoir tendance à trembler lorsque je serais face à l'équipe : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 4* . Je crains de ne pas trouver mes mots devant l'équipe : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 5 . J'arriverais à occuper l'espace en me déplacement tout en menant la communication : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 6* . Je crains d'être hésitant face à certaines réactions de l'équipe : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 7 . Je prendrais plaisir à m'exprimer par ma voix et mes gestes : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 8 . J'apprécierai avoir les mains libres : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 9* . Je crains de ne pas arriver à maintenir ma voix à un niveau correct : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 10* . Lorsque je préparerais la communication, je ressentirais de l'anxiété : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 11* . Ma voix pourra être amenée à trembler : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 12 . À l'issue de la situation de communication, je ressentirais avoir eu une expérience plaisante : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 13* . Je ne prendrais pas plaisir à m'exprimer par ma voix et mes gestes : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 14* . Le volume de ma voix pourra baisser en intensité : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 15* . Mes pensées risquent de devenir confuses et de se mélanger lorsque je serais face à l'équipe : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 16 . Je ne risque pas d'être affecté par mes émotions si la situation se tend : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 17 . Ma voix sera calme et posée : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 18 . Je ne ressentirais pas de peur à être face à l'équipe : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 19 . Bien que je sois nerveux(se) avant la situation de communication, j'oublierais rapidement mes peurs et apprécierais la situation : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 20 . J'imagine vivre la situation de communication en totale confiance : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 21* . Il m'arrivera de me tenir bras croisés : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 22 . Je me sentirais en pleine possession de mes moyens lors de l'échange : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 23 . Je serais à l'aise lorsque la première question me sera posée : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 24* . Je préférerais avoir des notes préalablement préparées sur lesquelles m'appuyer si besoin : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 25 . Je prendrais plaisir à observer les réactions des membres de l'équipe lors des échanges : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 26 . J'arriverais à prêter attention à ma posture physique : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 27* . Même si je vis couramment des situations similaires dans la vie de tous les jours, je serais embarrassé(e) face à l'équipe : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 28 . Je me sentirais relaxé(e) et confortable lors de la communication : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 29 . Bien que je n'aime pas ce genre de situation, je ne les redoute pas particulièrement : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 30* . J'évitais toujours les situations de communications délicates face à une équipe si possible : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 31* . Je risque d'éviter de regarder tous les membres de l'équipe lors des échanges : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 32* . Je risque d'être insatisfait(e) de ma prestation après avoir vécu la situation : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 33 . J'apprécierais préparer cette communication : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 34* . Face à une situation tendue, je risque d'être gêné(e) par mes émotions : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 35 . Mon esprit sera clair face à l'équipe : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 36 . Je serais assez à l'aise : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 37* . Je risque de transpirer et trembler avant la communication : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 38* . Je trouverais ma posture forcée et contre nature : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 39* . Je me sentirais inquiet(e) et tendu(e) tout au long de la communication : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 40 . J'arriverais à soutenir le regard des membres de l'équipe : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 41* . Une fois la communication terminée, j'aurais hâte de m'en aller : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 42* . J'apprécierai avoir quelque chose dans les mains : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 43* . Je risque d'avoir légèrement du mal à répondre au moment où la première question me sera posée : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 44 . Je trouve la perspective de cette situation légèrement plaisante : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 45* . Il sera difficile pour moi de chercher dans mon esprit les mots justes pour exprimer mes pensées : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 46 . Je n'hésiterais pas au moment de réagir aux réactions de l'équipe : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 47* . J'évitais de me déplacer pendant la communication : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 48* . Je suis terrifié(e) à l'idée de vivre cette situation face à l'équipe : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 49 . Je resterais maître de ma respiration : *pas du tout(0)-totalement(4)*
- 50 . J'arriverais à prendre le temps de poser des questions à l'équipe une fois la communication terminée : *pas du tout(0)-totalement(4)*

* : Items négatifs

**Holodeck Safran, questionnaire de conscience de soi
managers**

En cherchant à être le plus objectif possible, veuillez donner votre ressenti quant à [votre prestation]/[la prestation de l'apprenant] lors de la mise en situation :

ATTITUDE

- 1- [J'ai][Il/Elle a] correctement initié la communication : *pas du tout(0)-pas assez(1)-satisfaisant(2)-totalement(3)*
- 2- [J'ai][Il/Elle a] instauré un climat approprié : ni trop grave ni trop détendu : *pas du tout(0)-pas assez(1)-satisfaisant(2)-totalement(3)*
- 3- [Je me suis][Il/Elle s'est] montré(e) avenant(e) et ouvert(e) : *pas du tout(0)-pas assez(1)-satisfaisant(2)-totalement(3)*
- 4- [Je suis][Il/Elle est] resté(e) calme et posé(e) : *pas du tout(0)-pas assez(1)-satisfaisant(2)-totalement(3)*
- 5- [Je me suis][Il/Elle s'est] montré(e) compréhensif(ve) des craintes et interrogations : *pas du tout(0)-pas assez(1)-satisfaisant(2)-totalement(3)*
- 6- [Je me suis][Il/Elle s'est] montré(e) persuasif(ve) pour défendre la décision Société : *pas du tout(0)-pas assez(1)-satisfaisant(2)-totalement(3)*
- 7- [Je me suis][Il/Elle s'est] montré(e) rassurant(e) sur les perspectives et les conditions : *pas du tout(0)-pas assez(1)-satisfaisant(2)-totalement(3)*
- 8- [J'ai][Il/Elle a] suscité un échange et du questionnement : *pas du tout(0)-pas assez(1)-satisfaisant(2)-totalement(3)*

SUJET

- 9- [J'ai][Il/Elle a] correctement introduit le sujet : *pas du tout(0)-pas assez(1)-satisfaisant(2)-totalement(3)*
- 10- [J'ai][Il/Elle a] correctement contextualisé la décision : *pas du tout(0)-pas assez(1)-satisfaisant(2)-totalement(3)*
- 11- [J'ai][Il/Elle a] correctement adapté la forme à l'assistance : *pas du tout(0)-pas assez(1)-satisfaisant(2)-totalement(3)*
- 12- [J'ai][Il/Elle a] proposé des perspectives et un calendrier : *pas du tout(0)-pas assez(1)-satisfaisant(2)-totalement(3)*
- 13- [J'ai][Il/Elle a] donné suffisamment d'informations claires à l'équipe : *pas du tout(0)-pas assez(1)-satisfaisant(2)-totalement(3)*

EXPRESSION

- 14- [Ma][Sa] voix était audible et posée : *pas du tout(0)-pas assez(1)-satisfaisant(2)-totalement(3)*
- 15- Le ton de [ma][sa] voix était adéquat : *pas du tout(0)-pas assez(1)-satisfaisant(2)-totalement(3)*
- 16- [Mon][Son] rythme de la parole était fluide et assuré : *pas du tout(0)-pas assez(1)-satisfaisant(2)-totalement(3)*
- 17- [Je me suis][Il/Elle s'est] montré(e) serein(e) : *pas du tout(0)-pas assez(1)-satisfaisant(2)-totalement(3)*
- 18- [J'ai][Il/Elle a] fait preuve d'écoute active : *pas du tout(0)-pas assez(1)-satisfaisant(2)-totalement(3)*
- 19- [Mon][Son] regard était centré sur l'assistance : *pas du tout(0)-pas assez(1)-satisfaisant(2)-totalement(3)*
- 20- [Ma][Sa] posture physique était correcte : *pas du tout(0)-pas assez(1)-satisfaisant(2)-totalement(3)*

20

Holodeck Safran, étude des temps de parole

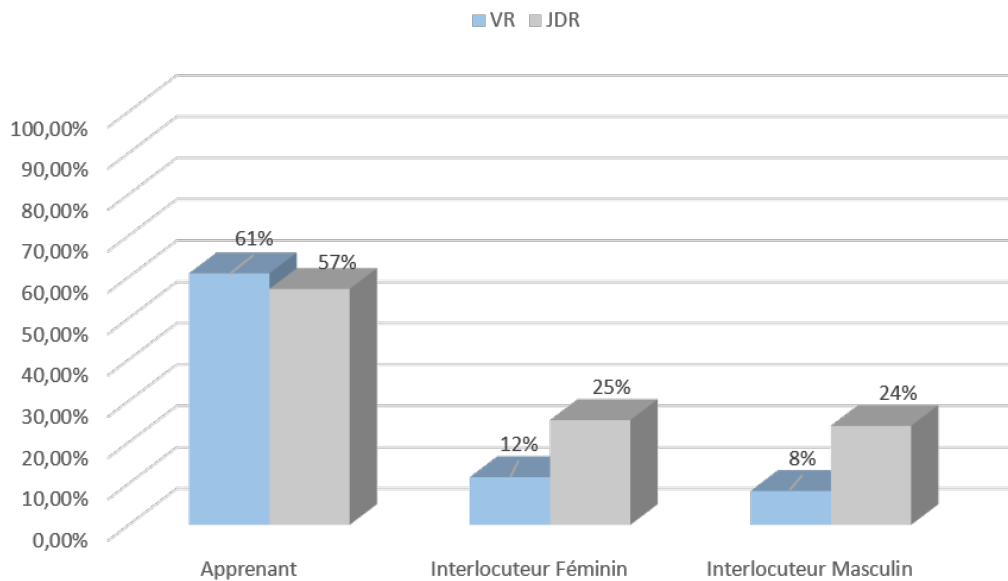


FIGURE 20.1: Proportions moyennes des temps de parole pour les commerciaux, lors de la première mise en situation

I Méthodologie

Afin d'analyser la dynamique des interactions, la répartition des temps de parole a été calculée à partir des annotations effectuées manuellement depuis les vidéos issues des premières mises en situation de chaque groupe. Sur celles-ci, nous avons ainsi mesuré la durée des prises de parole cumulées pour les apprenants, les personnages virtuels, et les acteurs des mises en situation.

Pour comparer ces résultats, nous avons normalisé les durées des prises de parole en pourcentage de la durée totale de la mise en situation. Nous avons ensuite calculé la moyenne arithmétique de ces proportions.

II Résultats pour les commerciaux, entre Réalité Virtuelle et jeu de rôle présentiel

Les résultats des mesures des temps de parole des premières mises en situation sont présentés en Figure 20.1.

Ils montrent un temps de parole proche entre les sujets passés sur le prototype en Réalité Virtuelle, et ceux ayant effectué le jeu de rôle présentiel.

Cependant, s'ils soulignent une répartition équilibrée entre les deux interlocuteurs des mises en situation réelle et virtuelle, ils révèlent néanmoins un écart important entre celle réalisée en Réalité Virtuelle et celle effectuée en présentiel.

III Résultats pour les managers, entre version visiocasque et version projetée

Les résultats des mesures des temps de parole lors des premières mises en situation sont présentés en Figure 20.2.

Ils montrent une répartition de parole quasi-identique entre les sujets de la version visiocasque et ceux de la version projetée.

IV Discussions

La mesure des temps de parole nous permet d'analyser la dynamique des interactions verbales.

À l'instar des résultats sur la présence sociale, ceux des équilibres de parole des commerciaux révèlent les échanges limités des personnages virtuels. Les interlocuteurs virtuels présentent en effet des temps de parole moyens nettement inférieurs à ceux du jeu de rôle présentiel.

Les entretiens oraux viennent confirmer ces observations. La moitié des sujets commerciaux a par exemple souligné un problème de dynamique des échanges.

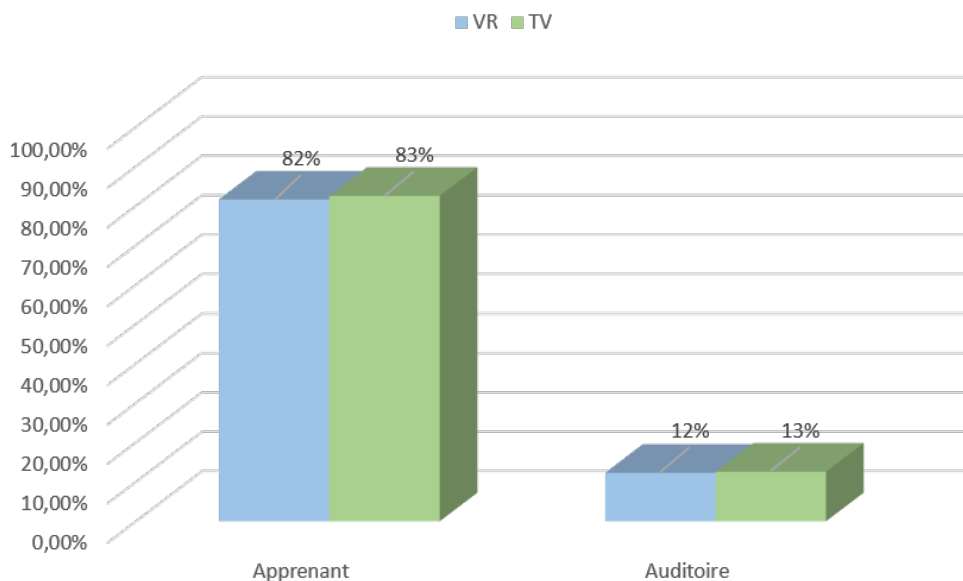


FIGURE 20.2: Proportions moyennes des temps de parole pour les managers, lors de la première mise en situation

Il semble compliqué d'atteindre un dynamisme proche de celui des jeux de rôles présentiels, d'autant plus dans le scénario des commerciaux, où l'apprenant doit être plus passif et à l'écoute pendant l'échange. Néanmoins, l'amélioration des personnages virtuels, de leur réactivité et de leurs propos disponibles est nécessaire pour essayer de limiter ces différences. Continuer d'analyser les temps de parole nous semble donc important, de sorte à observer si ces résultats tendent vers un écart moins important entre les deux types de mise en situation.

En additionnant les temps de parole moyen des interlocuteurs et des apprenants, on constate que ceux du jeu de rôle présentiel dépassent la durée totale de la mise en situation (106%), ce qui n'est pas le cas sur le prototype en Réalité Virtuelle (81%). Les jeux de rôle traditionnels ont en effet amené des situations où l'apprenant et les interlocuteurs parlaient en même temps. Or, pour le prototype, ce ne fut pas le cas. Les échanges ressemblaient alors à un exercice de questions/réponses structuré, et perdant en dynamisme et en authenticité. Analyser le corpus de vidéos constitué dans le cadre des expérimentations pourrait être une solution afin d'analyser ces situations et chercher à les reproduire dans l'environnement virtuel.

En revanche, nous observons des temps de parole proches entre les sujets en Réalité Virtuelle et ceux passés sur le jeu de rôle présentiel. Le prototype en Réalité Virtuelle semble donc ne pas avoir pas amené de retenue ou d'excès de parole de la part des sujets.

Enfin, il est également intéressant de noter que l'utilisation d'une version projetée n'a pas semblé influencer sur l'équilibre des temps de parole pour les managers. Les temps de parole moyens des deux groupes se sont en effet montrés similaires.

Seuils critiques du test de Kolmogorov-Smirnov

TABLE 21.1: Seuils critiques du test de Kolmogorov-Smirnov [172, 173] (source : <https://www.apprendre-en-ligne.net/random/KS.html>)

Taille de l'échantillon (n)	Seuils critiques $D_\alpha(n)$				
	$\alpha = .20$	$\alpha = .15$	$\alpha = .10$	$\alpha = .05$	$\alpha = .01$
1	.900	.925	.950	.975	.995
2	.684	.726	.776	.842	.929
3	.565	.597	.642	.708	.828
4	.494	.525	.564	.624	.733
5	.446	.474	.510	.565	.669
6	.410	.436	.470	.521	.618
7	.381	.405	.438	.486	.577
8	.358	.381	.411	.457	.543
9	.339	.360	.388	.432	.514
10	.322	.342	.368	.410	.490
11	.307	.326	.352	.391	.468
12	.295	.313	.338	.375	.450
13	.284	.302	.325	.361	.433
14	.274	.292	.314	.349	.418
15	.266	.283	.304	.338	.404
16	.258	.274	.295	.328	.392
17	.250	.266	.286	.318	.381
18	.244	.259	.278	.309	.371
19	.237	.252	.272	.301	.363
20	.231	.246	.264	.294	.356
25	.210	.220	.240	.270	.320
30	.190	.200	.220	.240	.290
35	.180	.190	.210	.230	.270
> 35	$1.07 / \sqrt{n}$	$1.14 / \sqrt{n}$	$1.22 / \sqrt{n}$	$1.36 / \sqrt{n}$	$1.63 / \sqrt{n}$

**Holodeck Safran, détail des troubles de la vision
rapportés par les sujets**

TABLE 22.1: Troubles de la vision des sujets commerciaux ayant utilisé le prototype en Réalité Virtuelle

Troubles	Sujets (identifiants)				
	CVR1	CVR4	CVR5	CVR6	CVR7
Astigmatisme		X		X	X
Daltonisme			X		
Hypermétropie		X	X		
Myopie	X				X
Presbytie				X	

TABLE 22.2: Troubles de la vision des sujets managers

Troubles	Managers-VR (identifiants)			Managers-TV (identifiants)		
	MVR1	MVR4	MVR5	MTV1	MTV3	MTV7
Astigmatisme		X				
Cécité d'un oeil				X		
Hypermétropie			X		X	
Non précisé	X					X

23

Holodeck Safran, analyse de l'interprétation d'une grille d'évaluation par deux formateurs différents

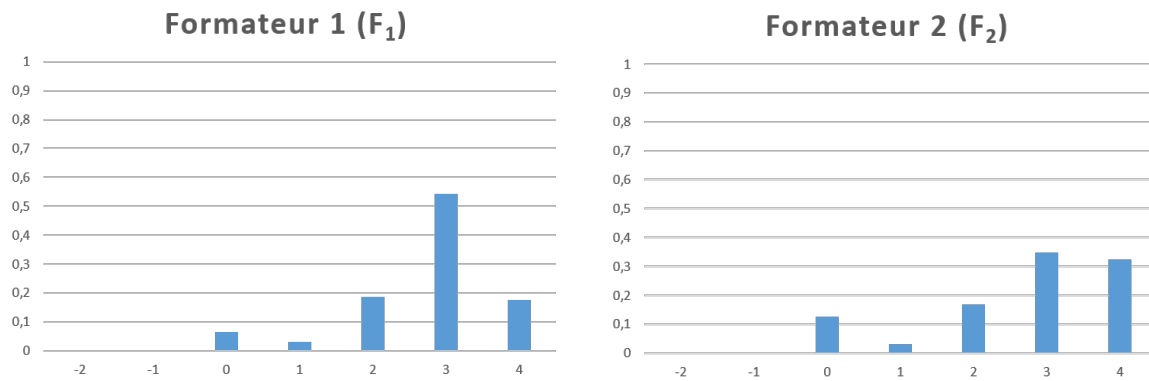


FIGURE 23.1: Distribution des évaluations effectuées par les deux formateurs commerciaux

Pour analyser les résultats des évaluations des commerciaux, nous proposons d'appliquer une méthodologie pour traiter les données. Les sujets furent en effet évalués selon une grille d'évaluation, remplie par deux formateurs.

Cette grille étant composée de variables qualitatives ordinales, nous avons souhaité analyser au préalable si l'interprétation de la grille était la même pour les deux formateurs. Si tel était le cas, nous considérons les évaluations comme deux variables quantitatives et nous calculions la moyenne arithmétique des deux évaluations de chaque item. En revanche, si la manière de remplir la grille différait entre les deux formateurs, nous traitons leurs évaluations comme deux variables qualitatives différentes.

Afin d'analyser l'interprétation de la grille par les formateurs, nous avons donc cherché à observer si les façons de noter des deux formateurs (F_1 et F_2) étaient identiques. Nous avons donc rassemblé toutes leurs notes exprimées, puis analysé leur distribution pour chaque formateur (Figure 23.1).

Comme nous observons une différence entre nos deux distributions, nous avons souhaité vérifier si elle n'était pas liée à une variation aléatoire. Pour ce faire, nous avons décidé d'utiliser la divergence de Kullback-Leibler [221]. Cette mesure permet de déterminer la dissimilarité entre deux distributions de probabilités. Dans notre cas, la divergence de Kullback-Leibler (D_{KL}) d'une distribution de probabilités discrètes (P) par rapport à une autre (Q) se détermine à partir de la formule :

$$D_{KL}(P||Q) = \sum_i \left(P(i) \times \log \left(\frac{P(i)}{Q(i)} \right) \right)$$

Nous avons donc calculé les divergences de Kullback-Leibler entre les distributions de chaque formateur (F_1 et F_2) à partir des formules :

$$D_{KL}(F_1||F_2) = \sum_i \left(F_1(i) \times \log \left(\frac{F_1(i)}{F_2(i)} \right) \right)$$

$$D_{KL}(F_2||F_1) = \sum_i \left(F_2(i) \times \log \left(\frac{F_2(i)}{F_1(i)} \right) \right)$$

Pour nos deux distributions des notes, nous obtenons ainsi les résultats suivants :

$$D_{KL}(F_1||F_2) = 0.0468$$

$$D_{KL}(F_2||F_1) = 0.0517$$

Cependant, nous n'avons pas trouvé de table statistique permettant de seuiller ces distances. Nous n'avons donc pas de seuil défini, en dessous duquel la plus petite divergence ($\text{Min}(D_{KL}(F_1||F_2), D_{KL}(F_2||F_1)) = 0.0468$) ne permet pas de différencier les deux distributions des évaluations de nos deux formateurs.

Nous avons donc procédé de façon empirique. Comme les valeurs d'un histogramme suivent un loi de Poisson, il est possible de générer des variations aléatoires sur les histogrammes des évaluations de chaque formateur.

Nous avons donc généré 10 000 variations aléatoires pour chaque formateur (F'_1 et F'_2)¹, puis relevé les divergences de Kullback-Leibler maximales sur ces échantillons de distributions ($D_{KL_{max}}(F'_1||F_1)$ et $D_{KL_{max}}(F'_2||F_2)$). Pour chaque distribution, nous avons ainsi pu relever les valeurs suivantes :

$$D_{KL_{max}}(F'_1||F_1) = 0.0092$$

$$D_{KL_{max}}(F'_2||F_2) = 0.0113$$

Notre seuil (α) pour établir une différence significative entre les deux manières de noter est donc :

$$\alpha = \text{Max}(D_{KL_{max}}(F'_1||F_1), D_{KL_{max}}(F'_2||F_2)) = 0.0113$$

La plus petite des divergences entre nos deux distributions est supérieure à ce seuil :

$$\text{Min}(D_{KL}(F_1||F_2), D_{KL}(F_2||F_1)) = 0.0468 > \alpha$$

Les façons de noter sont donc suffisamment différentes pour devoir différencier les notations de nos deux formateurs. Il est donc nécessaire de traiter leurs évaluations comme deux variables qualitatives différentes.

1. Le code Matlab utilisé peut être consulté en Annexe 24 (p.287)

**Code Matlab pour le seuillage de divergences de
Kullback-Leibler**

```

%% Computation section
nbEchantillons = 10000;
i = 1;

%Complete by replacing X
%Example : X = [0; 0; 88; 42; 273; 690; 203]
hF1 = [X];
%Example : Y = [1; 4; 148; 44; 220; 421; 360]
hF2 = [Y];

x = (1:nbEchantillons)';
dKLF1 = zeros(nbEchantillons,1);
dKLF2 = zeros(nbEchantillons,1);

% Normalizing & replacing zero values by 0.0001 as usual
F1 = hF1 ./sum(hF1);
F1 = max(F1,0.0001);

F2 = hF2 ./sum(hF2);
F2 = max(F2,0.0001);

for i=1:nbEchantillons

    rF1 = poissrnd(hF1);% F1'
    rF2 = poissrnd(hF2);% F2'

% Normalizing & replacing zero values by 0.0001 as usual
rF1 = rF1 ./sum(rF1);
rF1 = max(rF1,0.0001);

rF2 = rF2 ./sum(rF2);
rF2 = max(rF2,0.0001);

% DKL(F1 || F1')
temp = -rF1.*log(rF1./F1);
dKLF1(i) = sum(temp,1);

% DKL(F2 || F2)
temp = -rF2.*log(rF2./F2);
dKLF2(i) = sum(temp,1);
end

% Find alpha
alpha = max([dKLF1; dKLF2]);

%% Display section

% Find Index corresponding to maximum distance of F1 || F1'
[idxMaxdKLF1,maxdKLF1] = max(dKLF1);

% Find Index corresponding to maximum distance of E2 || E2'
[idxMaxdKLF2,maxdKLF2] = max(dKLF2);

offsetPlot = 100;
figure(1)
subplot(211)
plot(x,dKLF1,'b'),hold on,
plot(x(idxMaxdKLF1),maxdKLF1,'r+','Linewidth',2)
text(x(idxMaxdKLF1) + offsetPlot,maxdKLF1, num2str(maxdKLF1))
hold off

subplot(212)
plot(x,dKLF2,'r'),hold on,
plot(x(idxMaxdKLF2),maxdKLF2,'b+','Linewidth',2)
text(x(idxMaxdKLF2) + offsetPlot,maxdKLF2, num2str(maxdKLF2))
hold off

```

25

Holodeck Safran, étude de l'évolution des évaluations

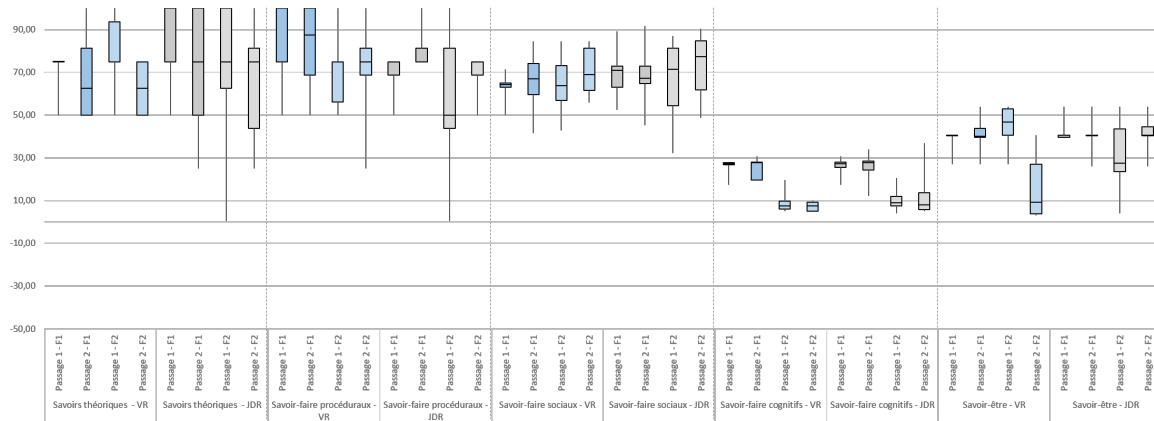


FIGURE 25.1: Évolution des évaluations des commerciaux, selon les savoirs concernés

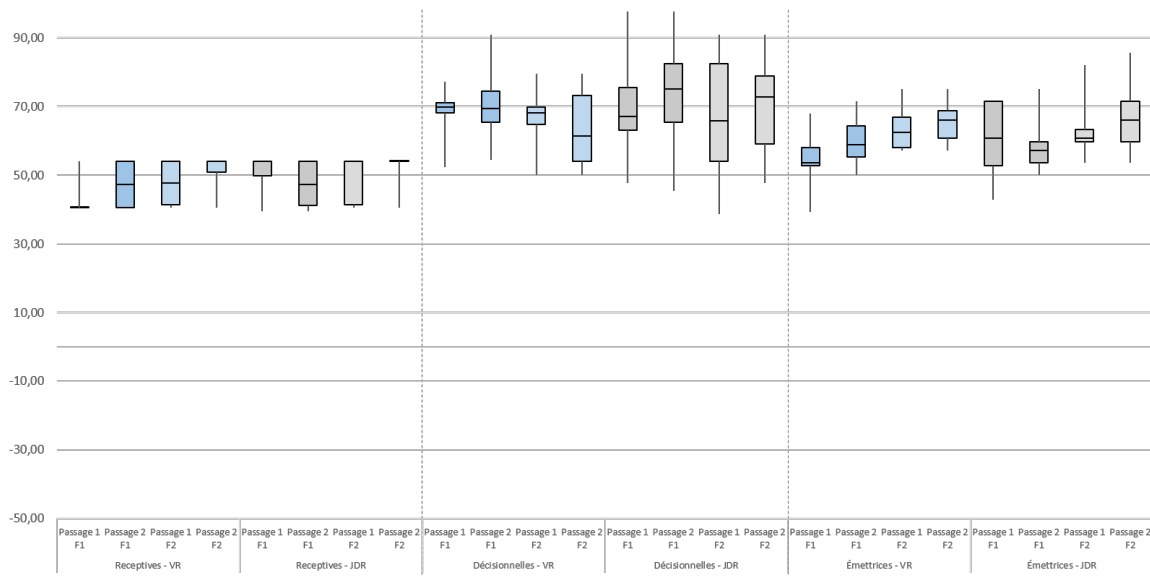


FIGURE 25.2: Évolution des évaluations des commerciaux, selon les habiletés concernées

I Résultats des évaluations pour les commerciaux, entre Réalité Virtuelle et jeu de rôle présentiel

Les évolutions des évaluations groupées par savoirs (Figure 25.1) permettent d'observer des différences pour les savoir-faire sociaux et les savoir-être.

Pour les savoir-faire sociaux, nous observons une légère amélioration des évaluations des deux formateurs, lors du deuxième passage du groupe de traitement (*VR*). Néanmoins, les tests statistiques effectués sur ces résultats n'ont pas montré de différences significatives (Wilcoxon rangs signés, $p > 0.05$).

Pour chaque formateur, les résultats semblent également inférieurs à ceux du groupe de contrôle (*JDR*) lors du premier passage. Cependant, les tests statistiques effectués sur ces résultats n'ont pas non plus montré de différences significatives (Wilcoxon-Mann-Whitney, $p > 0.05$).

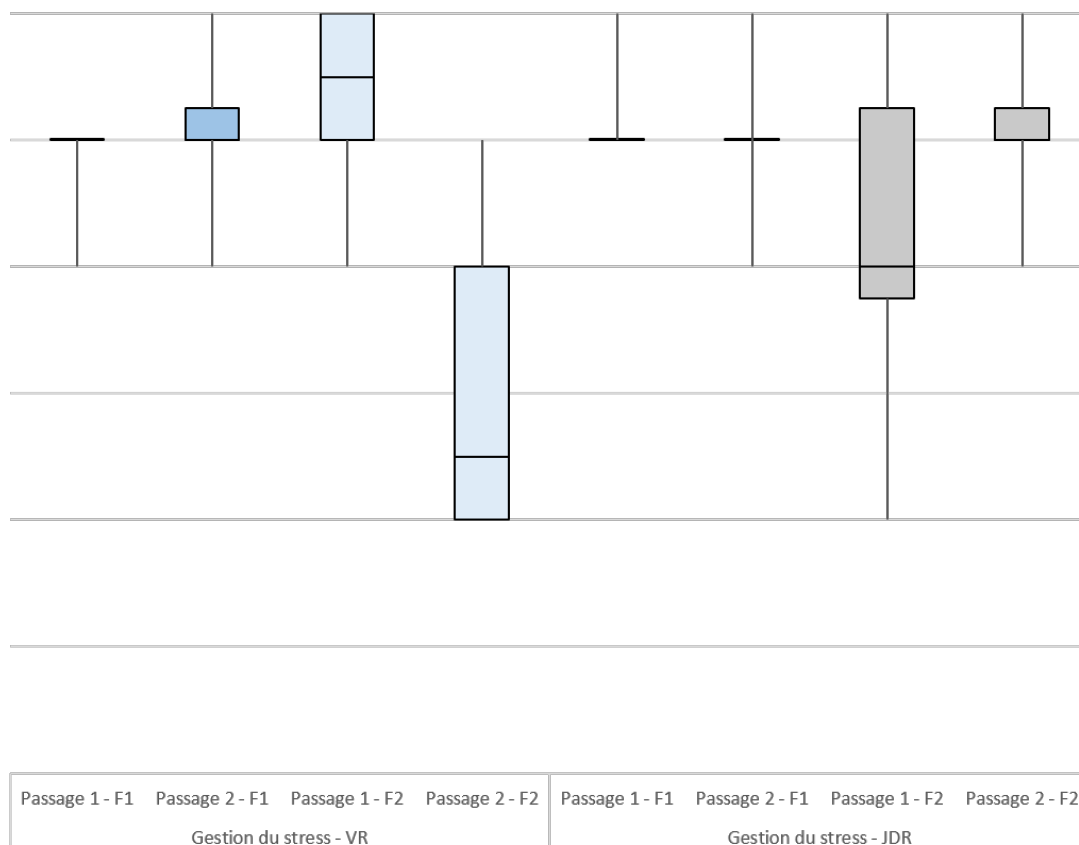
Les savoir-être montrent quant à eux une baisse des évaluations du *Formateur 2* lors du deuxième passage du groupe *VR*, alors que celles du groupe *JDR* semblent s'améliorer. Cette différence ne s'est cependant pas révélée suffisamment importante pour être statistiquement significative (Wilcoxon rangs signés, $p > 0.05$).

Pour ce formateur, les résultats semblent légèrement meilleurs pour le groupe *VR* que pour le groupe *JDR* lors du premier passage.

Les tests statistiques intra-groupes n'ont cependant pas permis de montrer les différences observées comme significatives (Wilcoxon rangs signés, $p > 0.05$).

Les évolutions groupées par habiletés (Figure 25.2) permettent également d'observer des différences.

Les habiletés réceptives semblent montrer une amélioration des évaluations du *Formateur 1* pour le second passage du

FIGURE 25.3: Évolution du savoir-être *Gestion du stress* pour les commerciaux

groupe *VR*, alors qu'il semble que ce soit l'inverse pour le groupe *JDR*. Cette différence ne s'est cependant pas avérée significative lors des tests statistiques (Wilcoxon rangs signés, $p > 0.05$).

De plus, on observe que ses évaluations sont plus faibles pour le premier passage du groupe *VR* que pour celui du groupe *JDR*. Néanmoins, les tests statistiques n'ont pas permis d'établir que cette différence est significative (Wilcoxon-Mann-Whitney, $p > 0.05$).

Les habiletés émettrices semblent quant à elles présenter une amélioration des évaluations des deux formateurs lors du second passage du groupe *VR*. Pour le *Formateur 1*, on observe l'effet inverse pour le groupe *JDR*. Les tests statistiques intra-groupes n'ont pas non plus permis de montrer que ces différences étaient significatives (Wilcoxon rangs signés, $p > 0.05$).

Là encore, les évaluations du *Formateur 1* semblent plus faibles pour le groupe *VR* lors du premier passage. Cette différence ne s'est cependant pas non plus montrée significative lors des tests statistiques (Wilcoxon-Mann-Whitney, $p > 0.05$).

Afin de chercher à expliquer toutes ces observations, nous avons entrepris d'analyser les résultats des items correspondant aux savoirs-être, aux savoir-faire sociaux, ainsi qu'aux habiletés réceptives et émettrices.

Nous avons donc pu relever les différences suivantes¹ :

- Le savoir-être de *Gestion du stress* (Figure 25.3) semble montrer une baisse des évaluations du *Formateur 2* pour le groupe *VR*, alors que celles du groupe *JDR* semblent s'améliorer. De plus, ses évaluations du groupe *VR* semblent supérieures à celles du groupe *JDR* lors du premier passage.
- Lors de la phase d'*Introduction*, les savoir-faire sociaux de *Présentation et d'échanges* ainsi que d'instauration d'un *Climat de confiance* (Figure 25.4) semblent indiquer une amélioration des évaluations des deux formateurs pour le groupe *VR*. Les évaluations du groupe *JDR* semblent en revanche ne pas évoluer sur ces items. Lors des premiers passages, les évaluations paraissent également plus faibles pour le groupe *VR*.
- Pour cette phase d'*Introduction*, le savoir-faire social de se montrer *Avenant* (Figure 25.4) semble montrer une amélioration des évaluations du *Formateur 1* pour le groupe *VR*, alors qu'elles semblent peu évoluer pour le groupe *JDR*.
- Au cours de la *Discussion*, les évaluations du *Formateur 2* concernant les savoir-faire sociaux d'*Attitude de leadership* et de *Force de conviction* (Figure 25.4) semblent s'améliorer pour les sujets du groupe *JDR*, quand celles du groupe *VR* semblent peu évoluer.
- Toujours au cours de la *Proposition*, le savoir-faire social de *Maîtrise de la situation* (Figure 25.4) montre une amélioration des évaluations des deux formateurs lors du second passage des sujets du groupe *JDR*. En revanche,

1. Les résultats de tous les item peuvent être consultés en Annexe 26 (p.295)

I. RÉSULTATS DES ÉVALUATIONS POUR LES COMMERCIAUX, ENTRE RÉALITÉ VIRTUELLE ET JEU DE RÔLE PRÉSENTIEL

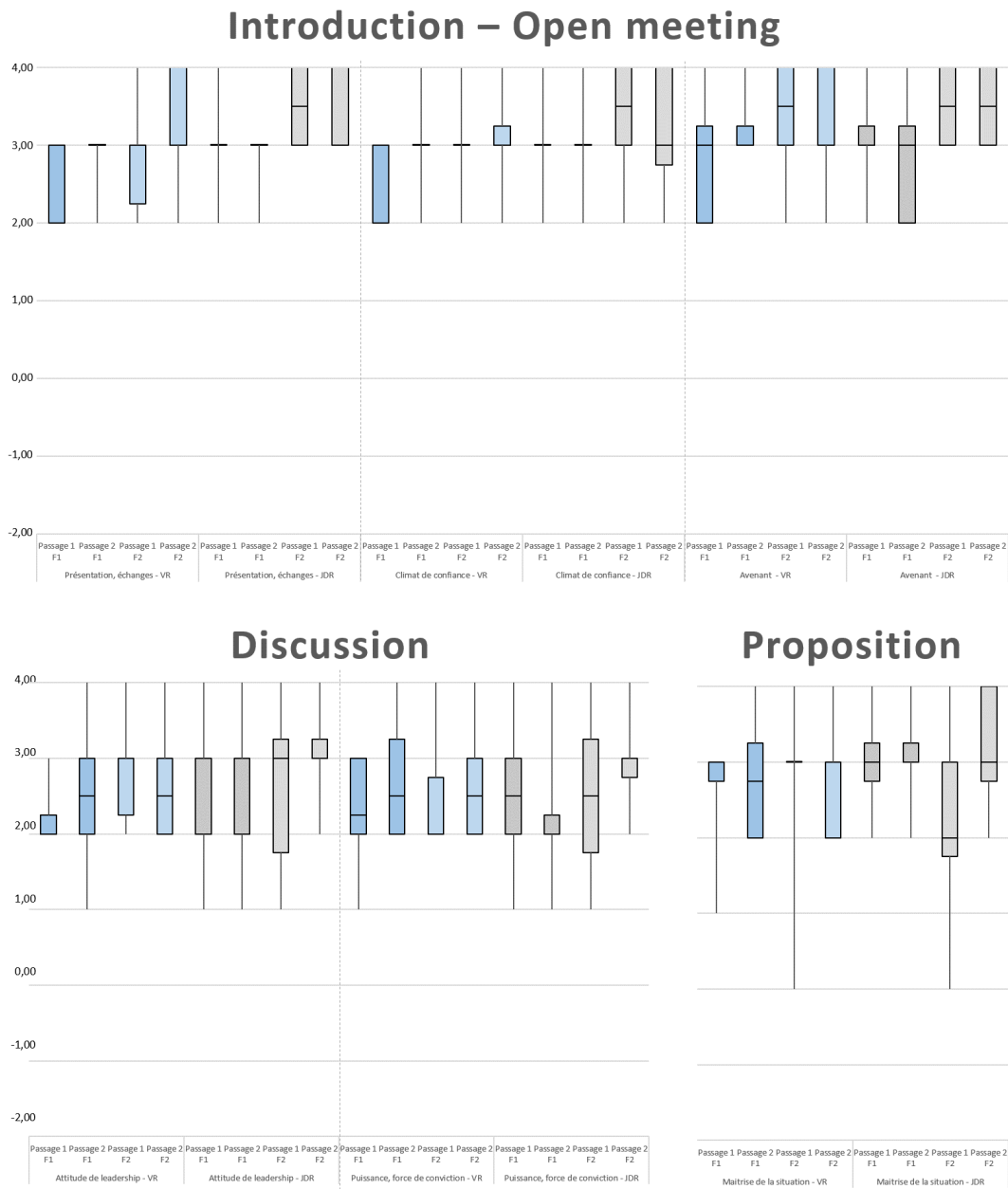


FIGURE 25.4: Différences d'évolution des évaluations de savoir-faire sociaux observées pour les commerciaux

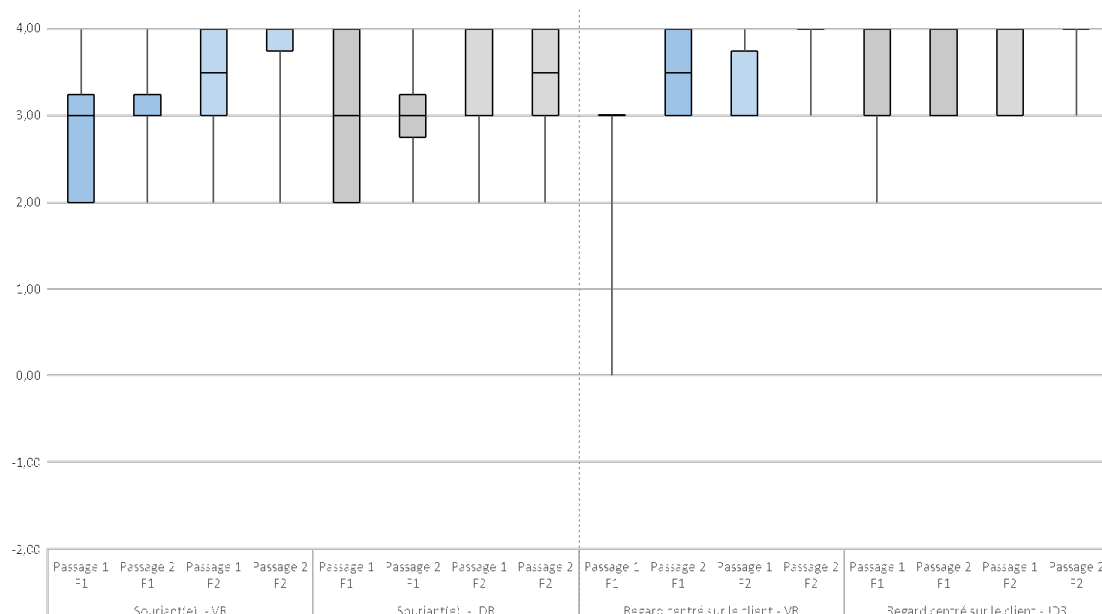


FIGURE 25.5: Différences d'évolution des évaluations d'habiletés émettrices pour les commerciaux

les évaluations du groupe VR ne semblent pas évoluer et celles des premiers passages des deux groupes semblent similaires.

- L'habileté émettrice de se montrer *Souriant* (Figure 25.5) semble montrer des améliorations des évaluations des deux formateurs pour le groupe VR, quand elles semblent se stabiliser pour le groupe JDR.
- L'habileté émettrice de l'utilisation d'un *Regard centré sur le client* (Figure 25.5) semble montrer une amélioration des évaluations du *Formateur 1* pour les sujets VR, quand celles du groupe JDR semblent peu évoluer. Les évaluations de ce formateur semblent également inférieures pour le groupe VR lors du premier passage.

Seules les évaluations du *Formateur 2* pour le savoir-faire social *Présentation et d'échanges* se sont avérées significativement inférieures pour le groupe VR (Wilcoxon-Mann-Whitney : $U = 12.0$, $z = -2.0479$, $p < 0.05$), avec une taille de l'effet importante ($r = 0.51$).

II Résultats des ressentis pour les managers, entre version visiocasque et version projetée

Nous avons analysé chaque item des questionnaires de ressenti des managers, en les structurant selon le savoir ou l'habileté concerné.

La Figure 25.6 présente les résultats pour lesquels des différences d'évolution des ressentis entre les deux groupes peuvent être observés².

Le savoir-être et les habiletés décisionnelles n'ont pas révélé de différences dans l'évolution d'un groupe à l'autre.

En revanche, nous avons relevé des différences pour les savoir-faire sociaux. Pour ceux-ci, trois items montrent des différences dans l'évolution des ressentis, entre les sujets ayant utilisé le visiocasque (groupe VR) et ceux ayant utilisé la version projetée (groupe TV).

Les faits de se montrer *Avenant et ouvert* et de réussir son *Introduction du sujet* montrent des améliorations pour le groupe VR lors du second passage, quand ceux du groupe TV semblent rester stable. Cependant, les tests statistiques n'ont pas permis d'établir ces différences comme significatives (Wilcoxon rang signés, $p > 0.05$).

Pour ces deux items, les évaluations du groupe VR semblent inférieures à celles du groupe TV lors de la première mise en situation. Néanmoins, les tests statistiques n'ont pas non plus montré que ces différences étaient significatives (Wilcoxon-Mann-Whitney, $p > 0.05$).

Enfin, pour l'*Initiation de la communication*, les résultats de la première mise en situation du groupe VR semblent s'améliorer lors du second passage. Là encore, cette différence ne s'est pas montrée significative lors des tests statistiques (Wilcoxon rang signés, $p > 0.05$).

Les habiletés émettrices permettent également d'observer quelques différences. Les ressentis des prestations des sujets VR pour la *Sérénité affichée* et la *Posture affichée* semblent en effet s'être améliorés lors du second passage. Les tests statistiques effectués sur ces résultats ne permettent cependant pas d'établir que ces différences soient significatives (Wilcoxon rang signés, $p > 0.05$).

2. Les résultats de tous les items peuvent être consultés en Annexe 27 (p.299)

II. RÉSULTATS DES RESENTIS POUR LES MANAGERS, ENTRE VERSION VISIOCASQUE ET VERSION PROJETÉE

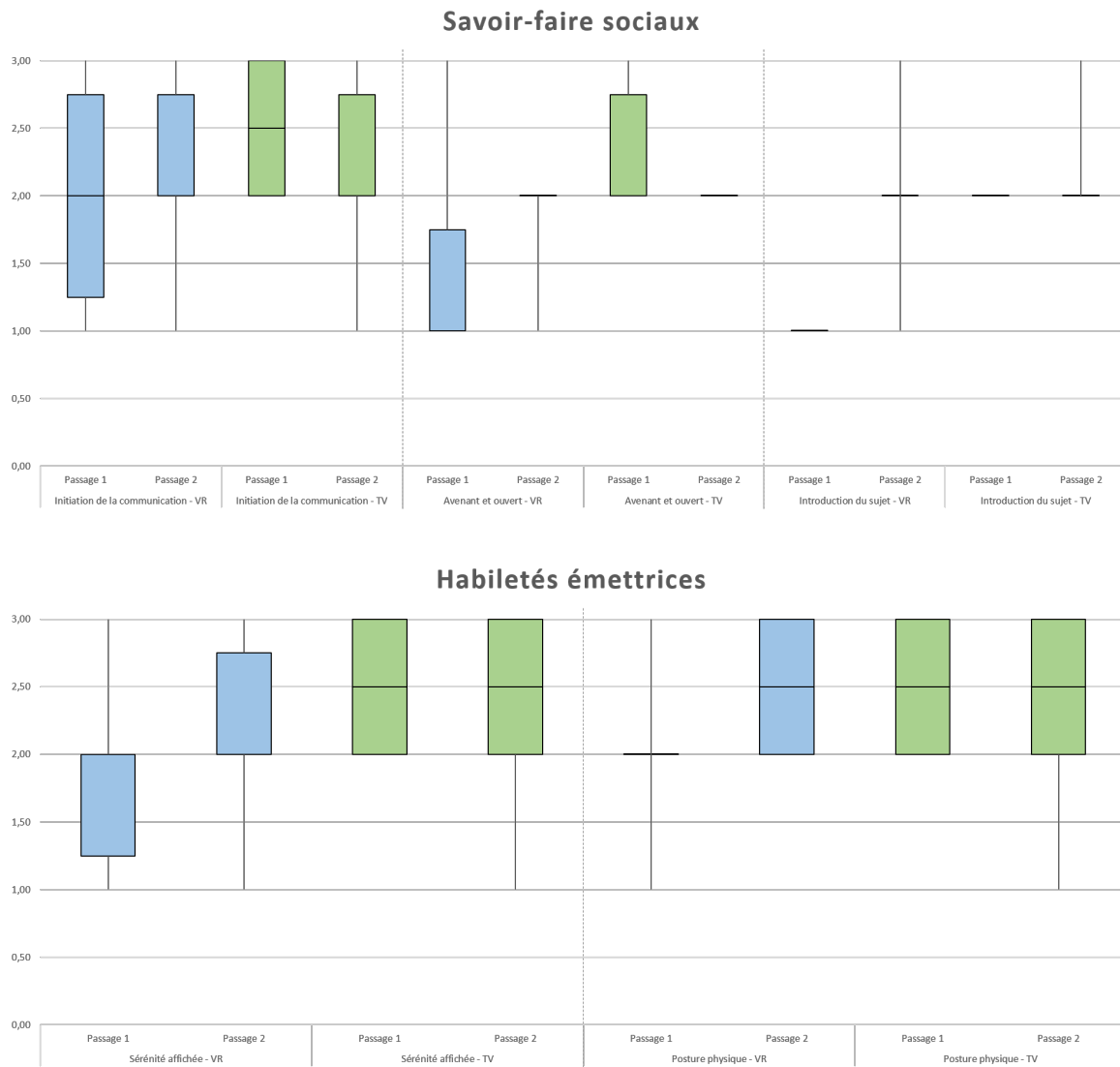


FIGURE 25.6: Évolution des ressentis de la prestation concernant les savoirs et habiletés des managers, pour lesquels des différences sont observables

Lors de la première mise en situation, les ressentis des prestations du groupe *VR* semblent aussi inférieurs à ceux du groupe *TV* pour ces deux items. Ces différences ne sont pas non plus montrées significatives à l'issue des tests statistiques (Wilcoxon-Mann-Whitney, $p > 0.05$).

26

**Holodeck Safran, résultats détaillés des évolutions
des évaluations pour les commerciaux**

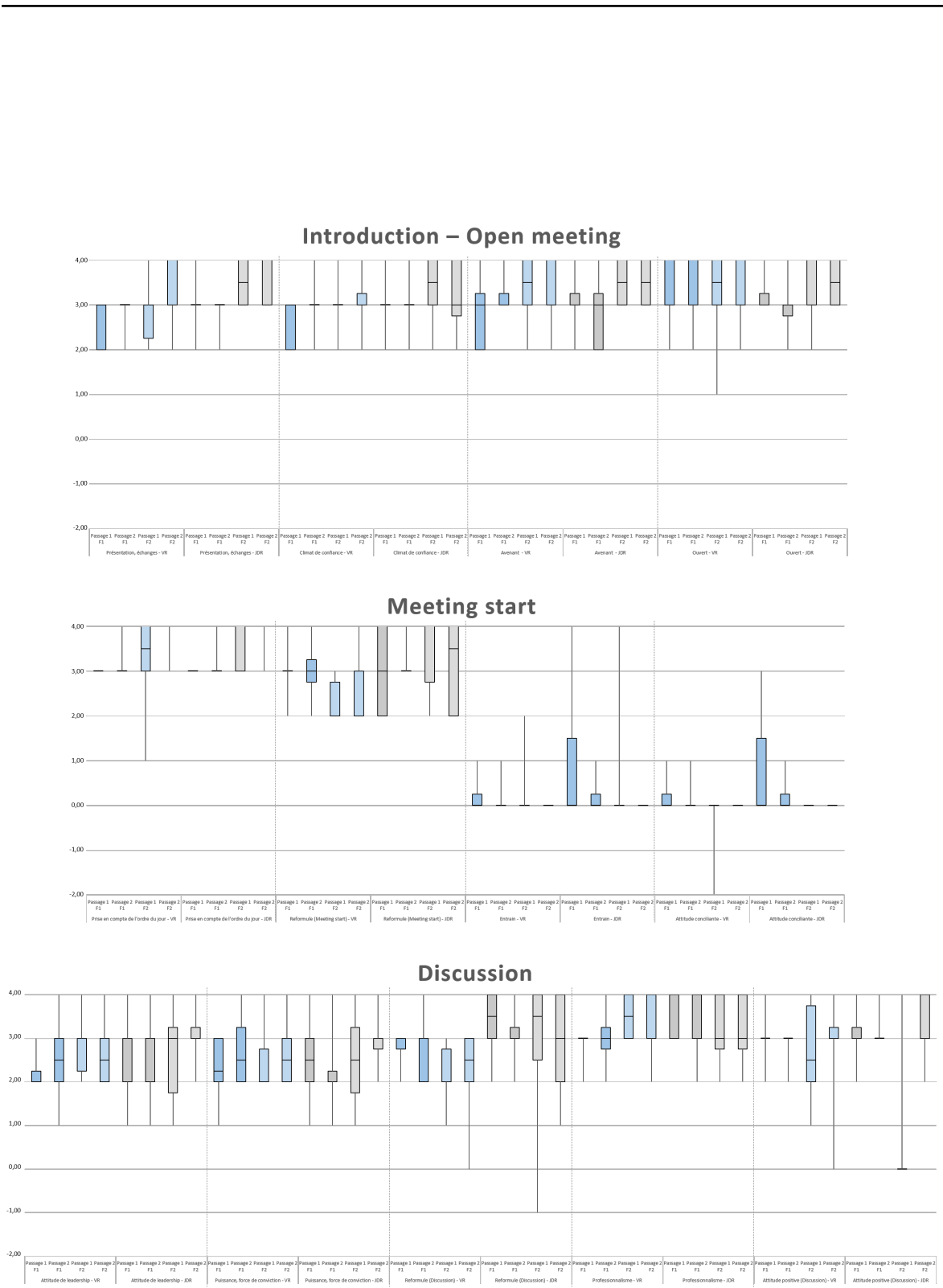


FIGURE 26.1: Résultats des évaluations de savoir-faire sociaux pour les commerciaux, phases d'Introduction, de Démarrage de la discussion (Meeting start) et de Discussion

ANNEXE 26. HOLODECK SAFRAN, RÉSULTATS DÉTAILLÉS DES ÉVOLUTIONS DES ÉVALUATIONS POUR LES COMMERCIAUX

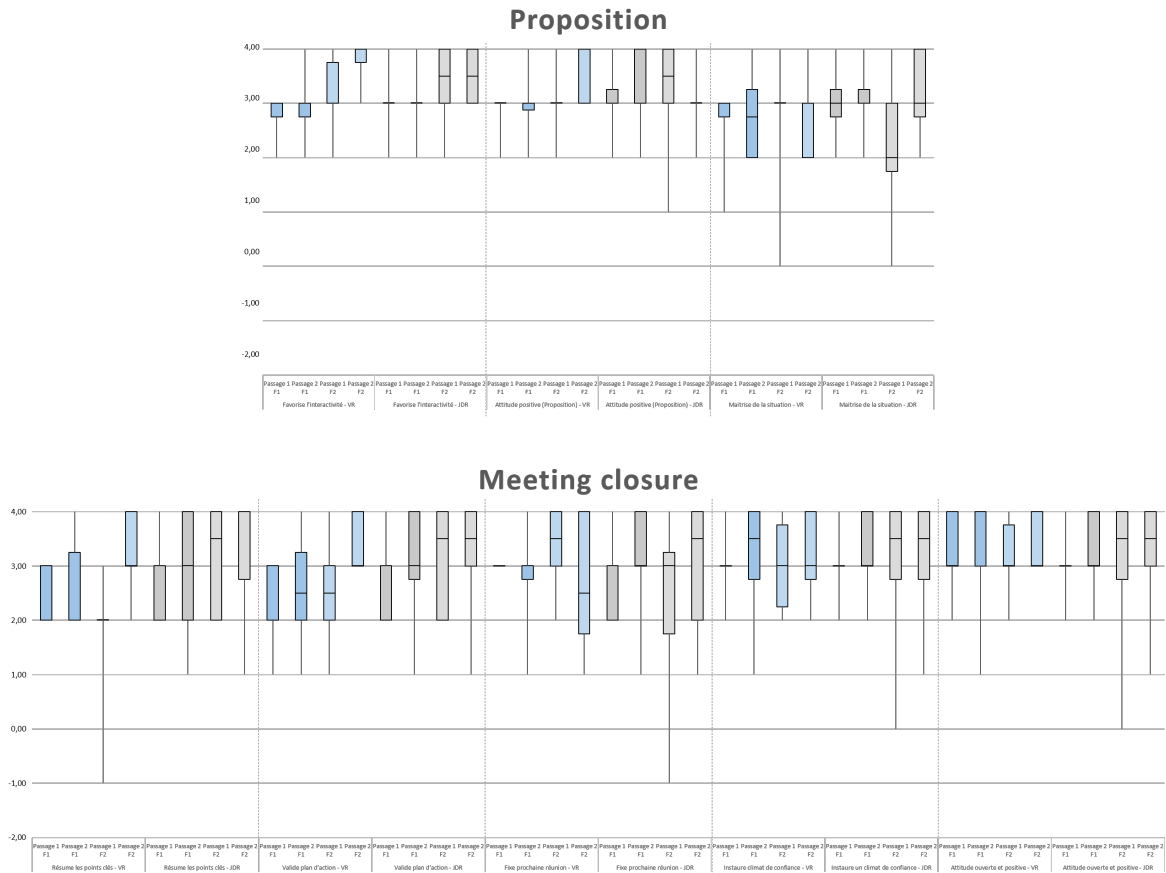


FIGURE 26.2: Résultats des évaluations de savoir-faire sociaux pour les commerciaux, phases de *Proposition* et de *Fin de la réunion (Meeting closure)*

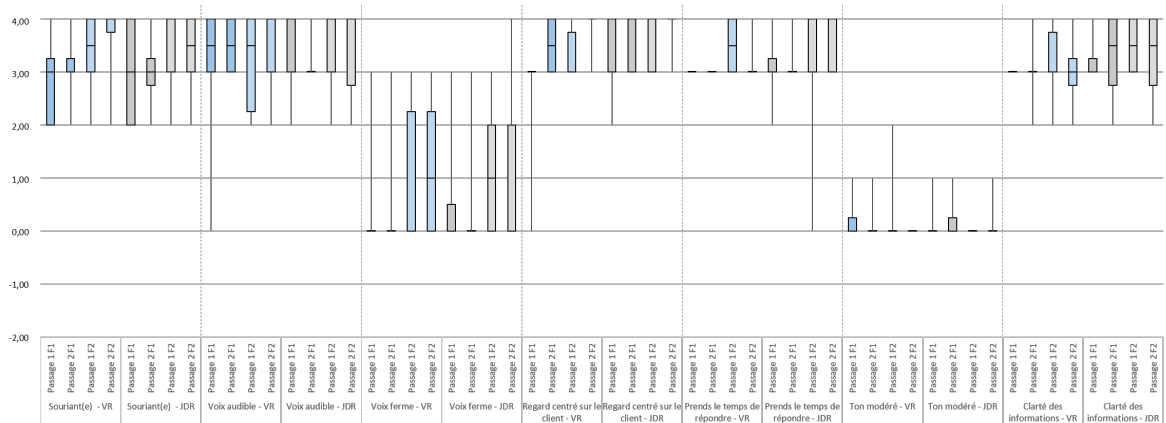


FIGURE 26.3: Évolution des évaluations d'habiletés émettrices pour les commerciaux

**Holodeck Safran, résultats détaillés des évolutions
des ressentis de la prestation pour les managers**

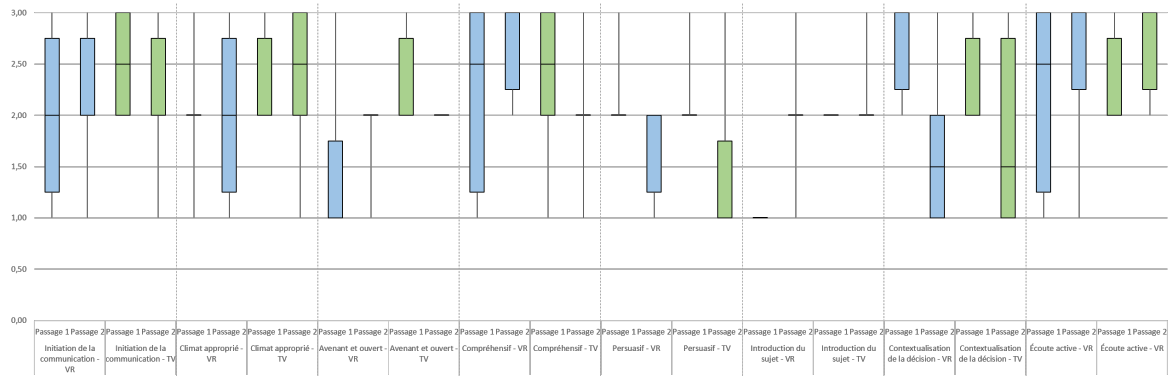


FIGURE 27.1: Évolution des ressentis de la prestation, concernant les savoir-faire sociaux pour les managers

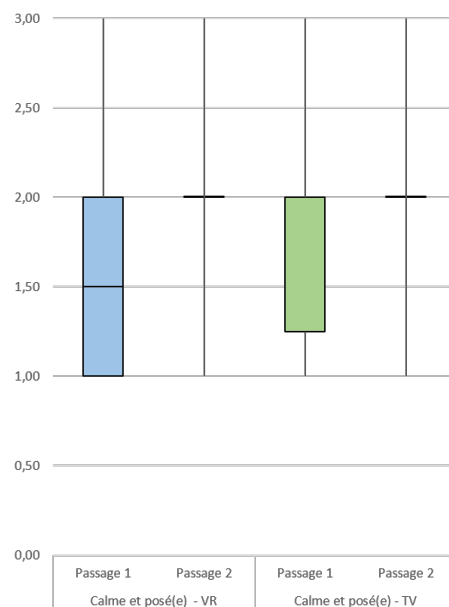


FIGURE 27.2: Évolution des ressentis de la prestation, concernant les savoir-être pour les managers

ANNEXE 27. HOLODECK SAFRAN, RÉSULTATS DÉTAILLÉS DES ÉVOLUTIONS DES RESENTIS DE LA PRESTATION POUR LES MANAGERS

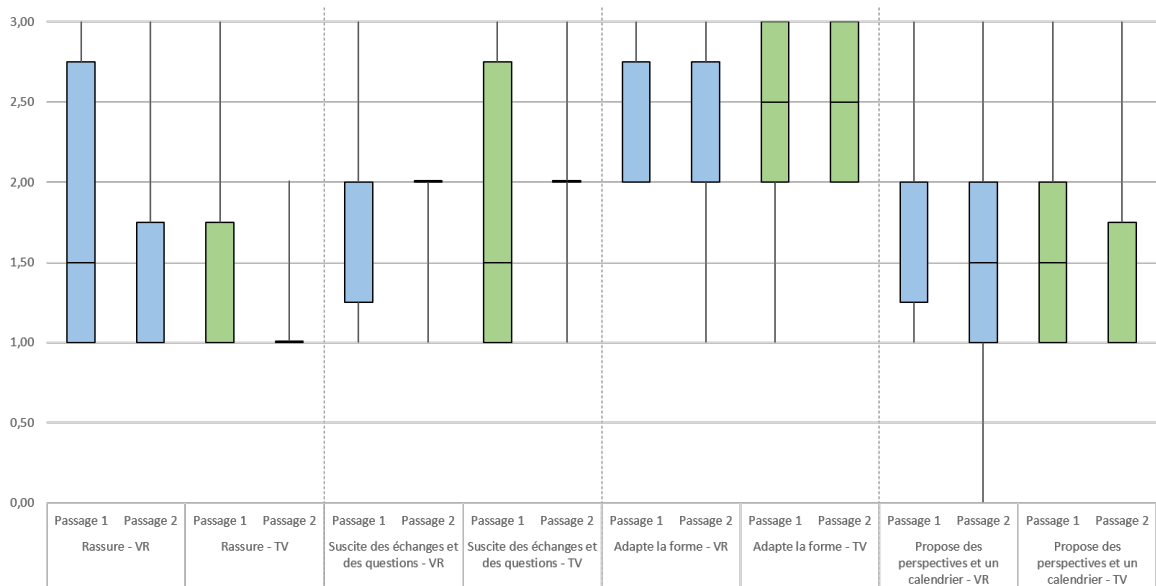


FIGURE 27.3: Évolution des ressentis de la prestation, concernant les habiletés décisionnelles pour les managers

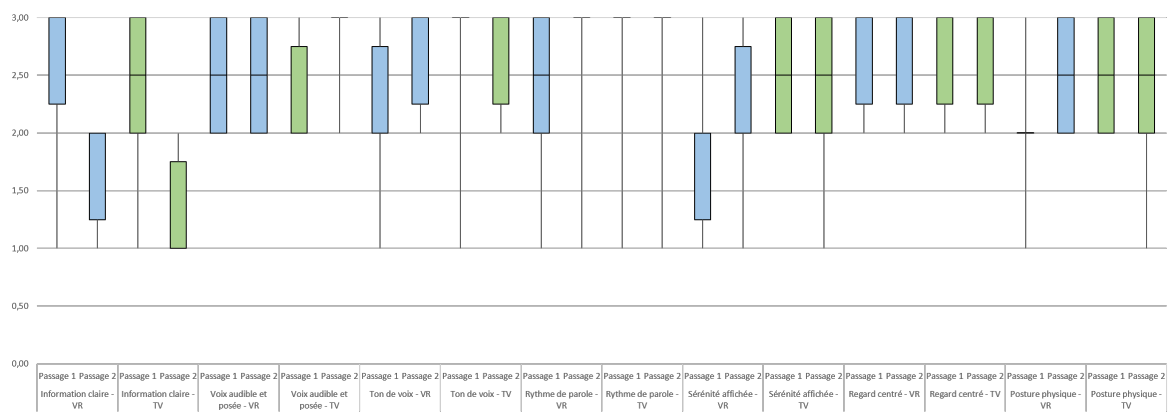


FIGURE 27.4: Évolution des ressentis de la prestation, concernant les habiletés émettrices pour les managers

28

Holodeck Safran, étude de la conscience de soi

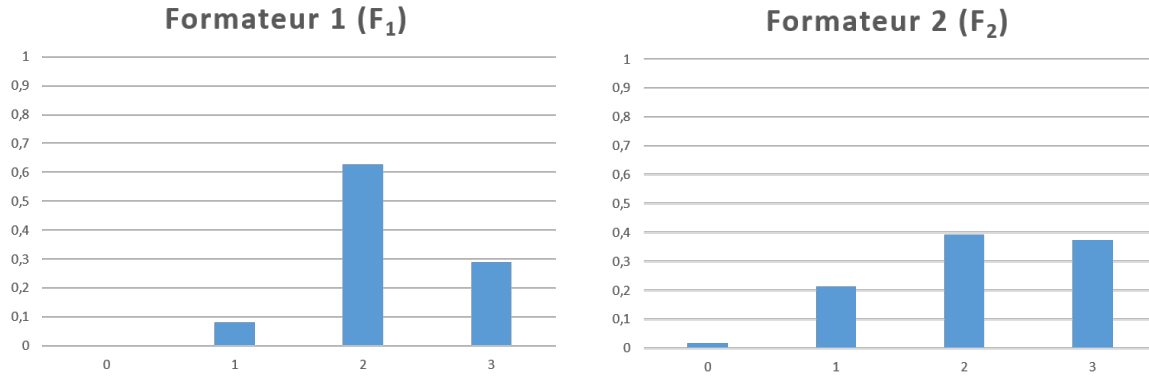


FIGURE 28.1: Distribution des ressentis exprimés par les deux formateurs commerciaux

I Méthodologie

Pour comparer les ressentis de la prestation des sujets avec ceux d'un formateur, nous avons utilisé le τ de Kendall [222]. Cette statistique permet en effet de quantifier l'association entre deux variables, en mesurant leur corrélation de rang. Ce coefficient de corrélation est compris entre -1 et 1. Il vaut ainsi -1 lorsque les deux variables sont complètement dissociées, 0 lorsqu'il n'y a aucune corrélation et 1 quand elles sont totalement corrélées.

Calculer le τ de Kendall entre les ressentis des sujets d'un groupe et ceux d'un formateur pour ce même groupe, permet ainsi de quantifier l'écart entre le ressenti de la prestation des sujets et celui d'un formateur.

Nous avons donc souhaité calculer et comparer le τ de Kendall pour les deux groupes de managers, de sorte à observer si des différences dans la conscience de soi pouvaient être perceptibles.

Pour les sujets Commerciaux, nous disposons de deux ressentis de la prestation, établis par deux formateurs différents. Les questionnaires prenant la forme d'échelles de Likert, les données extraites étaient qualitatives. Comme pour l'évolution des évaluations, nous avons donc souhaité analyser au préalable si l'interprétation de l'échelle était la même pour les deux formateurs. Si tel était le cas, nous regroupions tous les ressentis au sein de la même variable. En revanche, si la manière de remplir l'échelle différait entre les deux formateurs, nous traitons leurs ressentis comme deux variables différentes et calculons un τ de Kendall par groupe pour chacun d'entre eux.

Afin d'analyser l'interprétation de l'échelle par les formateurs, nous avons donc cherché à analyser si les façons de noter les ressentis des deux formateurs (F_1 et F_2) étaient identiques. Nous avons donc appliqué la même méthodologie que pour l'évolution des évaluations et analysé la distribution de tous les ressentis de chaque formateur (Figure 28.1).

Comme nous observons là-aussi une différence entre nos deux distributions, nous avons souhaité vérifier si elle n'était pas liée à une variation aléatoire en analysant également la divergence de Kullback-Leibler [221].

Pour nos deux distributions des ressentis, nous obtenons ainsi les résultats suivants :

$$\begin{aligned} D_{KL}(F_1||F_2) &= 0.0614 \\ D_{KL}(F_2||F_1) &= 0.0918 \end{aligned}$$

Nous avons donc procédé de façon empirique pour établir un seuil en dessous duquel la plus petite divergence ne permet pas de différencier les deux distributions des ressentis.

À nouveau, nous avons généré 10 000 variations aléatoires pour chaque formateur (F'_1 et F'_2)¹, puis relevé les divergences de Kullback-Leibler maximales ($D_{KL_{max}}(F'_1||F_1)$ et $D_{KL_{max}}(F'_2||F_2)$). Pour chaque distribution, nous avons ainsi obtenu les valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} D_{KL_{max}}(F'_1||F_1) &= 0.0341 \\ D_{KL_{max}}(F'_2||F_2) &= 0.0353 \end{aligned}$$

Notre seuil (α) pour établir une différence significative entre les deux manières de noter est donc :

$$\alpha = \text{Max}(D_{KL_{max}}(F'_1||F_1), D_{KL_{max}}(F'_2||F_2)) = 0.0353$$

La plus petite des divergences entre nos deux distributions est par conséquent inférieure à ce seuil :

$$\text{Min}(D_{KL}(F_1||F_2), D_{KL}(F_2||F_1)) = 0.0614 < \alpha$$

Les façons de noter sont donc suffisamment différentes pour devoir différencier les ressentis de nos deux formateurs. Nous avons ainsi dû traiter leurs ressentis comme des variables différentes et calculer un τ de Kendall par groupe pour chacun d'entre eux (τ_{F_1} et τ_{F_2}).

Lorsqu'une différence entre les τ de Kendall des deux populations est observée, nous analysons les résultats des questionnaires afin de regarder si certaines différences entre les ressentis des sujets et ceux des formateurs pouvaient être relevés.

1. Le code Matlab utilisé peut être consulté en Annexe 24 (p.287)

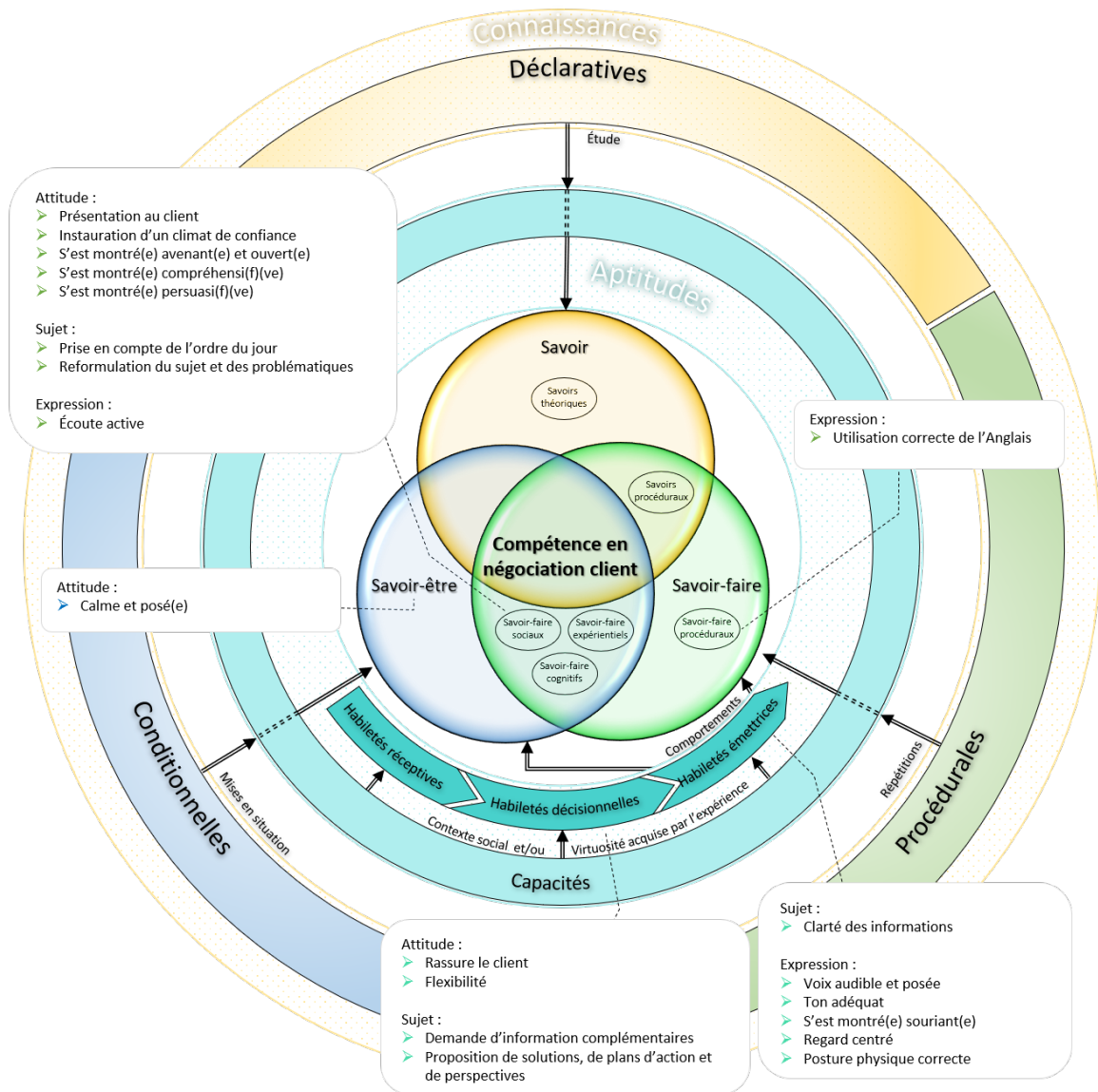


FIGURE 28.2: Distribution des items du questionnaire de ressenti des managers, en fonction des différents savoirs et habiletés

Nous avons ainsi voulu relever d'éventuels écarts entre les ressentis des formateurs et ceux des sujets, comportant des différences d'un groupe à l'autre. Lorsqu'une différence était relevée, nous avons donc cherché à observer si c'était également le cas pour l'autre groupe.

Pour les managers, nous avons structuré ces items en savoirs et habiletés, de la même manière que lors de l'analyse de l'évolution des évaluations (voir Figure 28.2).

Nous en avons fait de même pour les commerciaux, en répartissant les items du questionnaire en savoirs et habiletés correspondants (Figure 28.3).

II Résultats pour les commerciaux, entre Réalité Virtuelle et jeu de rôle présentiel

Pour chaque sujets commerciaux, nous avons donc calculé les τ de Kendall évaluant la corrélation entre les ressentis des sujets et ceux de chaque formateurs (τ_1 et τ_2). Lorsqu'on regarde les résultats pour chaque groupe (Figure 28.4), on observe des corrélations moins importantes pour les sujets ayant utilisé le prototype en Réalité Virtuelle. L'effet semble plus prononcé pour le premier formateur (τ_1) que pour le second (τ_2).

Les tests statistiques viennent en partie confirmer ces observations. Seule la différence pour τ_1 est suffisamment importante pour qu'elle ne soit pas liée à un effet de hasard (Table 28.1).

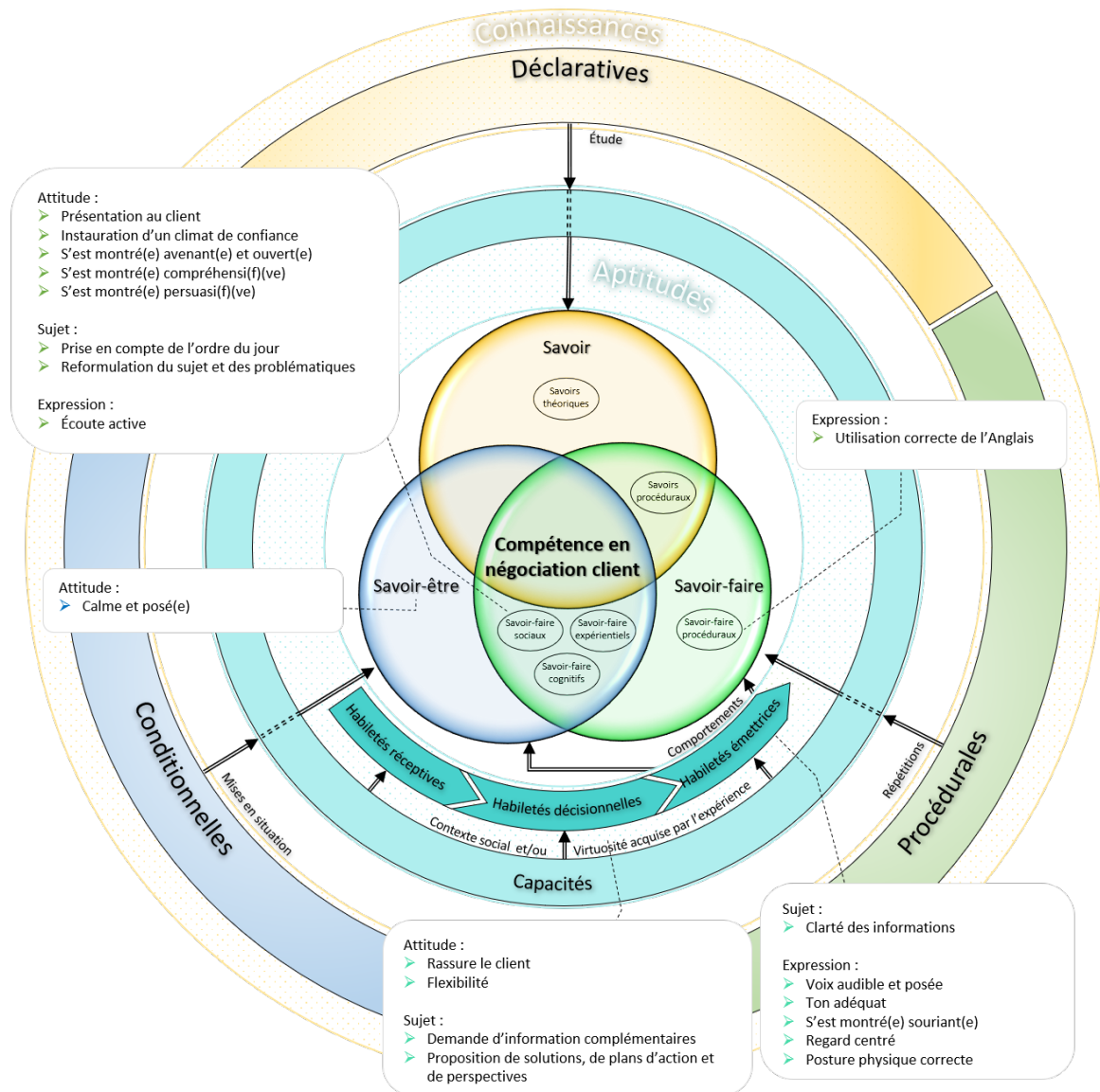


FIGURE 28.3: Distribution des items du questionnaire de ressenti des commerciaux, en fonction des différents savoirs et habiletés

TABLE 28.1: Résultats et tests statistiques des coefficients de corrélation (τ de Kendall), entre les ressentis des commerciaux et ceux des deux formateurs (τ_1 et τ_2)

τ	Groupe	Moyenne (\bar{x})	Résultat du test	Différence	Taille de l'effet
τ_1	VR	0.032 (± 0.231)	$t(14) = -3.411, p < 0.05$	Significative	$r = 0.67$
	JDR	0.372 (± 0.163)			
τ_2	VR	0.289 (± 0.153)	$p > 0, 05$	Non Significative	
	JDR	0.383 (± 0.244)			

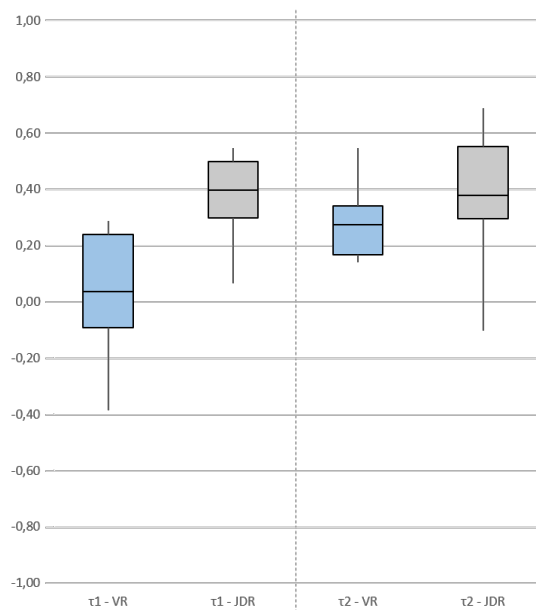


FIGURE 28.4: Coefficients de corrélation (τ de Kendall), entre les ressentis des commerciaux et ceux des deux formateurs (τ_1 et τ_2)

Nous avons cependant souhaité analyser les réponses aux questionnaires, en comparant les réponses des deux formateurs avec celles des sujets.

Les différentes suivantes ont retenu notre attention² :

- Le savoir-faire social d'*Écoute active* (Figure 28.5) semble indiquer des ressentis des sujets passés sur le jeu de rôle présentiel (*JDR*) globalement proches de ceux des formateurs. Il ne semble pas que ce soit le cas pour ceux du groupe de traitement en Réalité Virtuelle (*VR*). Le *Formateur 2* apparaît avoir eu un moins bon ressenti, quand les réponses du *Formateur 1* sont moins distribuées et indiquent toutes des prestations effectuées "*De manière perfectible (2)*".
- Le savoir-être *Calme et posé(e)* semble montrer un meilleur ressenti de la part des sujets *VR* que de la part des formateurs. Ces derniers s'avèrent d'ailleurs avoir donné des ressentis similaires entre-eux. Les résultats du groupe *JDR* semblent quant à eux indiquer l'effet inverse. Les formateurs apparaissent avoir eu un meilleur ressenti de la prestation que les sujets eux-même.
- L'habileté décisionnelle consistant à vouloir *Rassurer le client* (Figure 28.6) semble avoir recueilli des ressentis légèrement meilleurs de la part des sujets *VR*, par rapport ceux exprimés par les formateurs. Dans l'autre groupe, les sujets semblent en revanche avoir exprimé un ressenti proche de celui des formateurs. Pour cet item, les sujets semblent aussi avoir eu un ressenti légèrement meilleur en Réalité Virtuelle qu'en jeu de rôle présentiel.
- L'habileté décisionnelle de *Demande d'informations complémentaires* (Figure 28.6) montre des ressentis des sujets proches de ceux des instructeurs pour le jeu de rôle présentiel. En Réalité Virtuelle, on observe néanmoins des différences. Les sujets semblent en effet avoir eu un meilleur ressenti que le *Formateur 2*, quand le *Formateur 1* apporte le même ressenti pour tous les sujets (*De manière perfectible (2)*). On peut également relever que les ressentis du *Formateur 2* apparaissent inférieurs entre les deux groupes, alors que ceux des sujets semblent proches. Il est aussi intéressant de noter que la distribution des ressentis du *Formateur 1* est plus importante lors du jeu de rôle.
- L'habileté décisionnelle de *Proposition de solutions, de plan d'actions et de perspectives* (Figure 28.6) révèlent des ressentis similaires en jeu de rôle présentiel, alors qu'on peut relever des différences en Réalité Virtuelle. Pour ce groupe, les deux formateurs semblent en effet avoir un ressenti inférieur à celui des sujets. Il apparaît également que les deux formateurs ont exprimé un ressenti moins satisfaisant en Réalité Virtuelle qu'en jeu de rôle présentiel.
- L'habileté émettrice de *Clarté des informations* indique de meilleurs ressentis de la prestation pour les sujets *VR* par rapport à ceux des formateurs, quand ceux en jeu de rôle présentiel semblent similaires. Les ressentis des deux formateurs semblent également moins satisfaisants en Réalité Virtuelle qu'en jeu de rôle présentiel.
- L'habileté émettrice de l'utilisation d'un *Regard centré* semble indiquer une différence entre les ressentis des sujets et ceux du *Formateur 1* en Réalité Virtuelle. Ce dernier a attribué le même ressenti (*De manière perfectible (2)*) pour tous les sujets de ce groupe. Les ressentis des sujets et de l'autre formateur semblent en revanche similaires pour les deux groupes.

2. Les résultats de tous les items sont disponibles en Annexe 29 (p.315)

II. RÉSULTATS POUR LES COMMERCIAUX, ENTRE RÉALITÉ VIRTUELLE ET JEU DE RÔLE PRÉSENTIEL

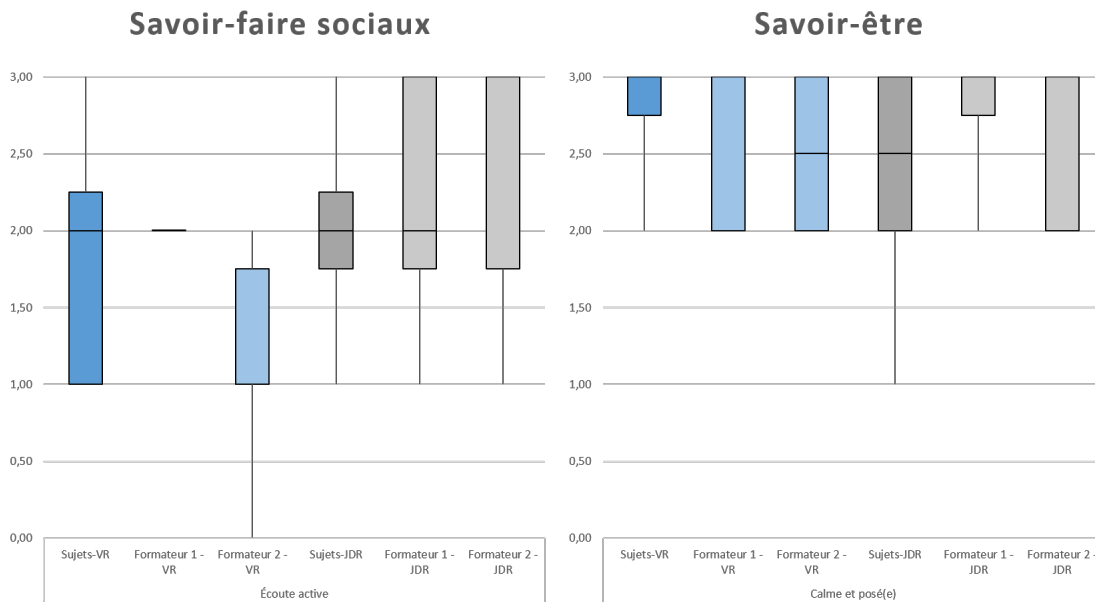


FIGURE 28.5: Résultats des questionnaires de conscience de soi des commerciaux selon les savoirs concernés, et pour lesquels des différences peuvent être observées

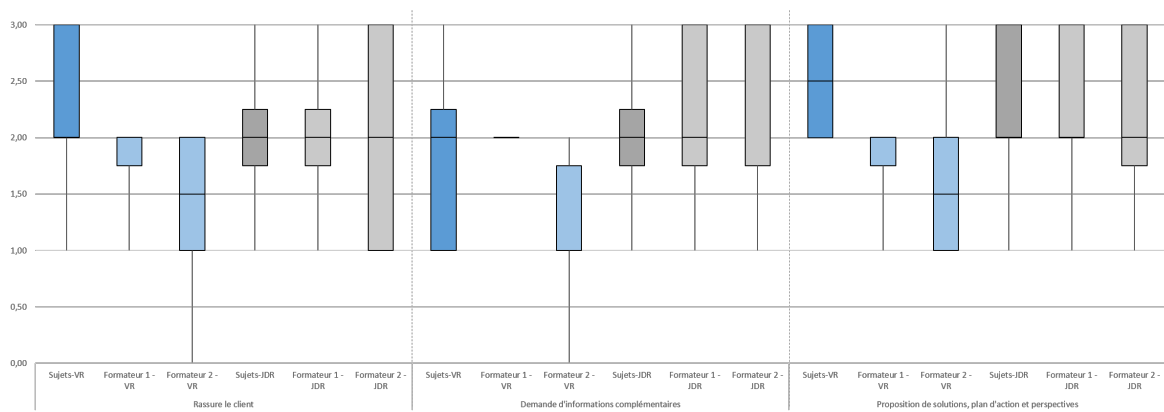


FIGURE 28.6: Items des questionnaires de conscience de soi des commerciaux, selon les habiletés décisionnelles concernées, et pour lesquels des différences peuvent être observées

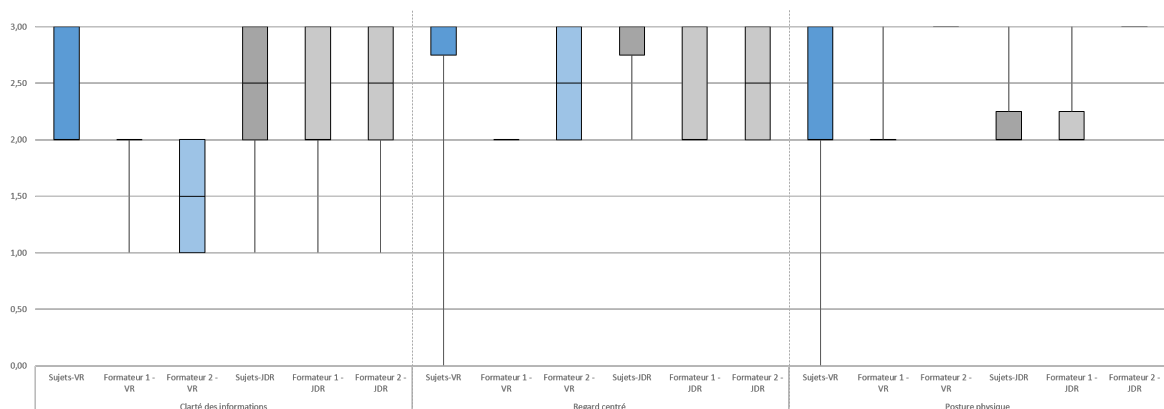


FIGURE 28.7: Items des questionnaires de conscience de soi des commerciaux, selon les habiletés émettrices concernées, et pour lesquels des différences peuvent être observées

TABLE 28.2: Résultats et tests statistiques (Wilcoxon-Mann-Whitney) des ressentis des sujets commerciaux (S) et de ceux des deux formateurs (F_1 et F_2), pour les items correspondants à des habiletés décisionnelles et pour lesquels des différences sont observées

Item	Groupe	Ressenti	Médiane (Me)	Résultat du test	Différence	Taille de l'effet
Rassure le client	VR	S	2.00	$S F_1 : p > 0.05$ $S F_2 : p > 0.05$	Non significative Non significative	
		F_1	2.00			
		F_2	1.50			
	JDR	S	2.00	$S F_1 : p > 0.05$ $S F_2 : p > 0.05$	Non significative Non significative	
Demande d'informations complémentaires	VR	S	2.00	$S F_1 : p > 0.05$ $S F_2 : p > 0.05$	Non significative Non significative	
		F_1	2.00			
		F_2	1.50			
	JDR	S	1.50	$S F_1 : p > 0.05$ $S F_2 : p > 0.05$	Non Significative Non significative	
Propositions de solutions	VR	S	2.50	$S F_1 : U = 12.0,$ $z = 2.05, p < 0.05$ $S F_2 : p > 0.05$	Significative Non significative	$r = 0.51$
		F_1	2.00			
		F_2	1.50			
	JDR	S	2.00	$S F_1 : p > 0.05$ $S F_2 : p > 0.05$	Non significative Non significative	
		F_1	2.00			
		F_2	2.00			

TABLE 28.3: Résultats et tests statistiques (Wilcoxon-Mann-Whitney) provenant des ressentis des sujets commerciaux (S) et de ceux des deux formateurs (F_1 et F_2), pour les items correspondants à des habiletés émettrices et pour lesquels des différences sont observées

Item	Groupe	Ressenti	Médiane (Me)	Résultat du test	Différence	Taille de l'effet
Clarté des informations	VR	S	2.00	$S F_1 : p > 0.05$ $S F_2 : U = 7.5,$ $z = 2.07, p < 0.05$	Non significative Significative	$r = 0.55$
		F_1	2.00			
		F_2	1.50			
	JDR	S	2.00	$S F_1 : p > 0.05$ $S F_2 : p > 0.05$	Non significative Non significative	
Regard centré	VR	S	2.00	$S F_1 : U = 12.0,$ $z = 2.05, p < 0.05$ $S F_2 : p > 0.05$	Significative Non significative	$r = 0.51$
		F_1	2.00			
		F_2	1.50			
	JDR	S	1.50	$S F_1 : p > 0.05$ $S F_2 : p > 0.05$	Non significative Non significative	
Posture physique	VR	S	2.50	$S F_1 : p > 0.05$ $S F_2 : p > 0.05$	Non significative Non significative	
		F_1	2.00			
		F_2	1.50			
	JDR	S	2.00	$S F_1 : p > 0.05$ $S F_2 : U = 8.0,$ $z = 2.47, p < 0.05$	Non significative Significative	$r = 0.62$
		F_1	2.00			
		F_2	2.00			

— L'habileté émettrice d'une *Posture physique* adéquate permet également d'observer quelques différences. Les sujets des deux groupes semblent exprimer des ressentis moins satisfaisants que le *Formateur 2*, alors qu'ils semblent similaires à ceux du *Formateur 1*. Celui-ci a en effet rapporté le même ressenti (*Parfaitement (3)*) pour tous les sujets, tous groupes confondus.

Il est intéressant de souligner qu'on peut aussi observer une différence pour les ressentis des sujets en Réalité Virtuelle. Les résultats montrent en effet une distribution plus importante.

Seules certaines de ces différences observées se sont révélées significatives lors des tests statistiques.

Pour le groupe *VR*, les ressentis du *Formateur 2* concernant l'habileté décisionnelle de *Demande d'informations complémentaires* se sont révélés significativement inférieurs ceux exprimés pour le groupe *JDR* (Wilcoxon-Mann-Whitney, $U = 8.0$, $z = 2.00$, $p < 0.05$), avec une taille de l'effet importante ($r = 0.53$).

Pour l'habileté décisionnelle consistant à *Proposer des solutions, des plan d'actions et des perspectives*, le *Formateur 1* a exprimé des ressentis significativement inférieurs à ceux des sujets du groupe en Réalité Virtuelle, avec une taille de l'effet importante (Table 28.2).

Les ressentis du *Formateur 2* concernant l'habileté émettrice de *Clarté des informations* se sont également montrés significativement inférieurs à ceux des sujets du groupe *VR*, avec une taille de l'effet importante (Table 28.3).

Pour l'habileté émettrice d'utilisation d'un *Regard centré*, le *Formateur 1* a exprimé des ressentis significativement inférieurs à ceux des sujets en Réalité Virtuelle, avec une taille de l'effet importante (Table 28.3).

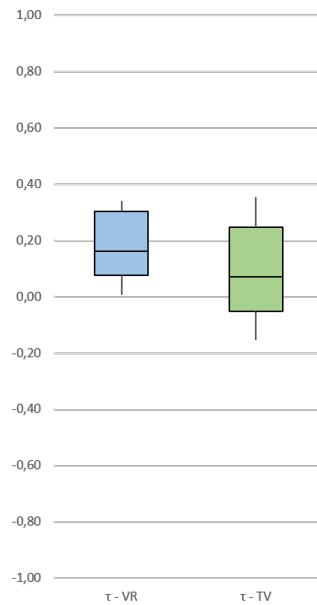


FIGURE 28.8: Coefficients de corrélation (τ de Kendall), entre les ressentis des managers et ceux du formateur

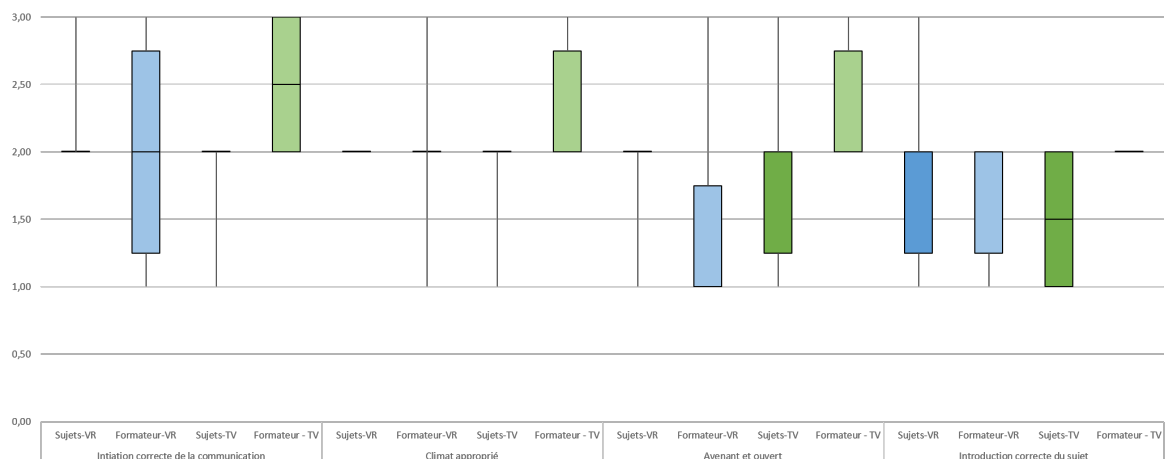


FIGURE 28.9: Résultats des questionnaires de conscience de soi des managers, selon les savoirs-faire sociaux concernés, et pour lesquels des différences peuvent être observées

Enfin, les ressentis du *Formateur 2* au sujet de l'habileté émettrice d'un *Posture physique* adéquate se sont quant à eux avérés significativement supérieurs à ceux des sujets du groupe *JDR* uniquement, avec une taille de l'effet importante (Table 28.3).

III Résultats pour les managers, entre version visiocasque et version projetée

Pour les sujets managers, nous avons également calculé les τ de Kendall pour chaque groupe, afin d'analyser la corrélation des ressentis des sujets avec ceux du formateur. Les résultats pour chaque groupe semblent indiquer une corrélation plus importante lors de l'utilisation du visiocasque (Figure 28.8).

Néanmoins, cette différence ne s'est pas avérée suffisamment importante pour exclure l'hypothèse qu'elle soit liée à un effet de hasard (test de Student, $p > 0.05$).

Cependant, nous avons voulu analyser les réponses aux questionnaires, en comparant les réponses des sujets à celles des formateurs.

Nous avons ainsi relevé des différences observables sur des items correspondant à des savoirs (Figures 28.9 et 28.10) et des habiletés (Figure 28.11 (p.311)).

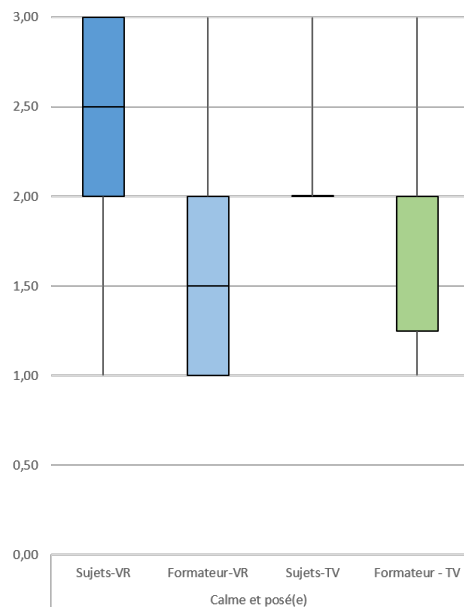


FIGURE 28.10: Résultats des questionnaires de conscience de soi des managers, selon les savoirs-être concernés, et pour lesquels des différences peuvent être observées

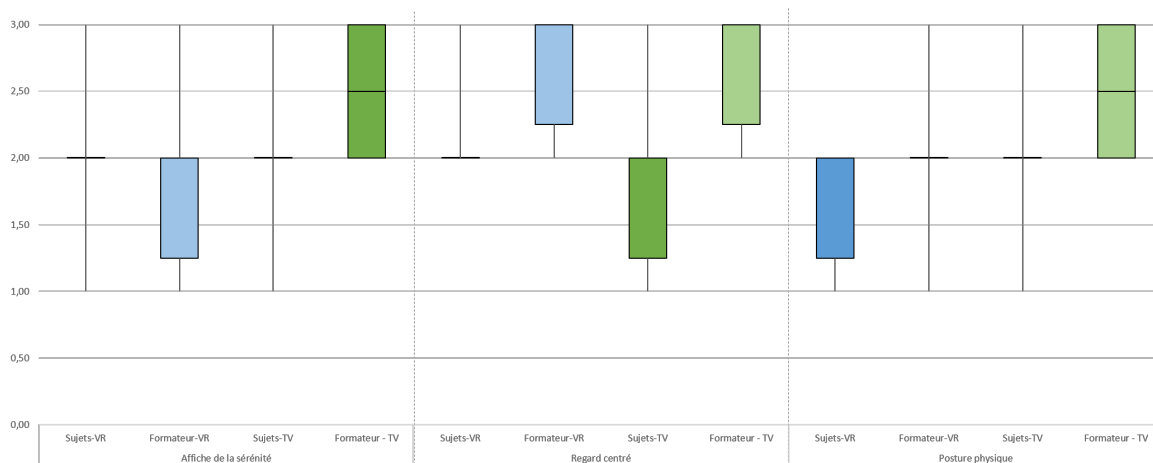


FIGURE 28.11: Items des questionnaires de conscience de soi des managers, selon les habiletés émettrices concernées, et pour lesquels des différences peuvent être observées

Pour les savoir-faire sociaux, plusieurs items semblent montrer les mêmes différences (Figure 28.9) : l'Initiation correcte de la communication, l'instauration d'un Climat approprié, ainsi que le fait de s'être montré Avenant et ouvert et celui d'avoir Introduit correctement le sujet. Alors que les ressentis des sujets semblent similaires d'un groupe à l'autre, celui des formateurs semble plus satisfaisant pour la version projetée.

Cependant, les tests statistiques n'ont pas révélé ces différences comme significative (Wilcoxon-Mann-Whitney, $p > 0.05$).

Le seul item correspondant à un savoir-être était le fait de s'être montré Calme et posé(e) (Figure 28.10). Pour cet item, si les sujets des deux groupes semblent avoir eu un meilleur ressenti que le formateur, cet effet apparaît être plus marqué pour le groupe ayant utilisé le visiocasque.

Néanmoins, les tests effectués n'ont pas non plus permis d'établir ces différences comme statistiquement significatives (Wilcoxon-Mann-Whitney, $p > 0.05$).

Pour les habiletés, nous avons relevé des différences sur trois items correspondant à des habiletés émettrices : la Sérénité affichée, le Regard centré et la Posture physique (Figure 28.11).

L'item Affiche de la sérénité montre que les sujets des deux groupes ont exprimé le même ressenti de la prestation, alors que le formateur en donne un plus satisfaisant.

Cette différence ne s'est cependant pas révélée significative lors des tests statistiques (Wilcoxon-Mann-Whitney, $p > 0.05$).

Le *Regard centré* indique au contraire un ressenti similaire pour le formateur. On peut néanmoins observer que les sujets ayant utilisé la version projetée semblent indiquer moins de satisfaction.

Les tests statistiques effectués n'ont cependant pas permis d'identifier cette différence comme significative (Wilcoxon-Mann-Whitney, $p > 0.05$).

Enfin, la *Posture physique* montre un ressenti moins satisfaisant pour les sujets de la version visiocasque, tant vis à vis de celui du formateur qu'à celui des sujets de l'autre version.

Pour la version projetée, le ressenti du formateur semble d'ailleurs plus satisfaisant tant à celui exprimé pour la version visiocasque, qu'à celui des sujets eux-mêmes.

Là encore, ces différences ne se sont pas révélées statistiquement significatives lors des tests (Wilcoxon-Mann-Whitney, $p > 0.05$).

IV Discussions sur la conscience de soi

L'analyse des τ de Kendall a permis de relever une corrélation significativement inférieure entre des ressentis de la prestation du *Formateur 1*, pour les sujets commerciaux en Réalité Virtuelle et en jeu de rôle présentiel, pour le *Formateur 1* des commerciaux. Nous avons également pu observer la même différence pour le *Formateur 2*, sans qu'elle ne s'avère significative lors des tests statistiques.

Pour les sujets managers, nous avons aussi observé une corrélation potentiellement moins importante entre les ressentis de la prestation des sujets ayant utilisé la version projetée et ceux du formateur. Cet effet ne s'est cependant pas non plus avéré significatif lors des tests statistiques.

L'analyse des résultats des items des questionnaires ne permettent pas d'établir d'effets sur la conscience de soi, mais viennent corroborer en revanche des points précédemment soulevés par l'analyse d'autres résultats.

Certains résultats viennent ainsi rejoindre des problématiques soulevées lors de l'analyse des évaluations³ :

- Impact de la Réalité Virtuelle et du visiocasque sur la dimension émotionnelle.

Lors de l'analyse des évolutions des évaluations, nous avons émis l'hypothèse que la Réalité Virtuelle pourrait permettre de favoriser la gestion des émotions pour la formation aux compétences sociales⁴.

Certains résultats issus des expérimentations sur la conscience de soi, entre Réalité Virtuelle et les jeux de rôle présentiels, viennent étayer cette hypothèse. Chez les sujets en Réalité Virtuelle, nous avons par exemple observé un meilleur ressenti des sujets quant au fait de s'être montré *Calme et posé(e)*. Nous avons aussi établi la même observation pour l'habileté décisionnelle de vouloir *Rassurer le client*. Il est probable que les sujets passés en Réalité Virtuelle, se sentant plus calmes, aient eu plus de facilités à se montrer rassurants.

Les résultats des expérimentations sur les managers, visant à comparer l'utilisation du visiocasque à une version projetée, corroborent également cette hypothèse. Nous avons en effet observé de meilleurs ressentis des sujets par rapport à ceux du formateur, pour le savoir-être *Calme et posé(e)*. Cet effet a semblé se manifester de manière plus marquée chez les utilisateurs du visiocasque. Cela vient renforcer l'hypothèse, évoquée lors des discussions sur l'évolution des évaluations, selon laquelle l'impact de la Réalité Virtuelle sur la gestion des émotions serait plus important avec le visiocasque.

Cependant, les résultats des managers semblent aussi exprimer de meilleurs ressentis du formateur chez le groupe de la version projetée, pour l'habileté émettrice *Affiche de la sérénité*, alors que les sujets des deux groupes montrent des ressentis similaires. Nous supposons qu'en contrepartie de se sentir plus calme avec le visiocasque, les sujets peuvent se montrer moins vigilants quant à leurs habiletés émettrices correspondantes à la sérénité affichée (posture, gestuelle, signes de nervosité, etc.).

Enfin, comme évoqué lors des discussions sur l'évolution des évaluations, il est important de ne pas négliger la possibilité que ces effets puissent être une conséquence d'une mise en difficulté accrue lors du jeu de rôle présentiel.

- Nécessité d'une phase de familiarisation à l'interaction sociale.

L'analyse de l'évolution des évaluations a aussi précédemment permis d'identifier la nécessité d'une phase de familiarisation à l'interaction sociale⁵. Nous avons vu que cet effet était potentiellement plus justifié lors de l'utilisation d'un visiocasque.

Les résultats des managers sur la conscience de soi viennent confirmer cette nécessité. Les mêmes savoir-faire sociaux nous ayant permis de relever des difficultés dans l'initialisation des échanges, ont là aussi montré des différences. Qu'ils utilisent le visiocasque ou la version projetée, les sujets semblent donner des ressentis similaires. En revanche, comme nous l'avons vu précédemment, les ressentis des formateurs semblent plus satisfaisants pour la version projetée.

Il est donc possible que les sujets n'aient pas une conscience accrue de cet effet là, et qu'il soit plus facilement observable depuis un point de vue extérieur. Comme mentionné lors des discussions sur l'évolution des ressentis, des expérimentations supplémentaires seraient nécessaires afin de voir si l'ajout d'une phase de familiarisation venait atténuer cet effet.

- Problématique d'observation des habiletés en Réalité Virtuelle.

Nous avons précédemment souligné que l'évaluation d'habiletés émettrices soulevait la problématique du changement de position du formateur en Réalité Virtuelle⁶.

3. Voir paragraphe 2.7. *Évolution des évaluations* (p.143)

4. Voir discussions p.146

5. Voir discussions p.147

6. Voir discussions p.147

Outre la difficulté d'observation liée à l'utilisation du visiocasque, nous avons notamment relevé que la distance du formateur avec la position de l'interlocuteur, pouvait potentiellement impacter l'observation de certaines habiletés émettrices. Les ressentis correspondant à certains savoirs peuvent ainsi être impactés, puisqu'ils s'infèrent à partir de ces observations. Nous supposons donc que ce changement de paradigme du formateur est à l'origine des différences observées entre Réalité Virtuelle et jeu de rôle présentiel, pour le savoir-faire social d'*Écoute active* et l'habileté décisionnelle *Rassurer le client*. Pour ces deux items, nous avons observé que les formateurs semblaient exprimer des ressentis moins satisfaisants en Réalité Virtuelle, tant par rapport à ceux des sujets, qu'à ceux qu'ils ont eux-même exprimé pour les sujets du groupe passé sur le jeu de rôle présentiel.

Nous avons également souligné l'impact potentiel de l'utilisation de l'interface magicien d'Oz sur l'observation des habiletés par le formateur. Là encore, les expérimentations sur la conscience de soi entre Réalité Virtuelle et jeu de rôle présentiel viennent étayer cette problématique. Le *Formateur 1* manipulait le panneau de contrôle afin de piloter les personnages virtuels. Pour l'habileté émettrice du *Regard centré*, nous avons observé qu'il exprimait le même ressenti pour tous les sujets en Réalité Virtuelle. Pour ce groupe, nous avons aussi relevé que les ressentis du formateur étaient significativement inférieurs à ceux exprimés par les sujets, avec une taille de l'effet importante. Dans le même temps, les ressentis des sujets et de l'autre formateur semblent ne pas évoluer en fonction du groupe concerné. Il est donc ainsi probable que cette différence soit liée à l'utilisation de l'interface magicien d'Oz.

Comme nous l'avons précédemment souligné lors des discussions sur l'évolution des évaluations, ces résultats viennent renforcer la nécessité d'implémenter des indicateurs à disposition du formateur, établis depuis la perception potentielle des interlocuteurs.

— Impact de l'utilisation du visiocasque sur la vigilance posturale.

Suite aux résultats des évolutions des évaluations, nous avons émis l'hypothèse que les apprenants pourraient se montrer plus vigilants quant à leur posture lorsqu'ils utilisent le visiocasque⁷.

Les résultats sur la conscience de soi tendent à appuyer cette hypothèse.

Les sujets commerciaux du groupe Réalité Virtuelle semblent exprimer des ressentis significativement moins satisfaisants que ceux du *Formateur 2* pour la *Posture physique*. Nous avons également observé que la distribution de leurs ressentis était plus importante que celle des sujets du groupe jeu de rôle.

Comme mentionné lors des discussions autour de l'évolution des évaluations, il est probable que cet effet soit plus marqué lorsque les sujets utilisent un visiocasque.

En effet, les sujets managers ayant utilisé ce dispositif ont semblé exprimer un ressenti moins satisfaisant de leur *Posture physique*. De plus, les ressentis du formateur semblent également moins satisfaisants pour ce groupe.

Comme nous l'avons expliqué lors des discussions précédentes, des expérimentations supplémentaires seraient nécessaires afin de vérifier cette hypothèse.

Enfin, d'autres résultats semblent rejoindre un point soulevé lors de l'analyse des résultats sur la présence sociale. Lors des entretiens, un nombre non négligeable de sujets managers ayant utilisé la version projetée, avaient éprouvé des difficultés pour identifier le personnage virtuel ayant pris la parole⁸.

Cet effet s'est également manifesté lorsque nous avons analysé les résultats sur la conscience de soi. Les sujets du groupe projeté semblent en effet avoir exprimé un ressenti moins satisfaisant que celui du formateur, pour l'utilisation d'un *Regard centré* sur ses interlocuteurs. Nous supposons que les difficultés éprouvées pour identifier son interlocuteur peuvent avoir affecté les sujets dans leur utilisation du regard.

Enfin, les mêmes limites que celles identifiées lors de l'analyse de l'évolution des évaluations tendent à se poser.

Les questionnaires, conçus de manière empirique à partir de travaux avec les formateurs métiers, comportent une forte part de subjectivité. Bon nombre de savoirs, savoir-faire et savoir-être sont concernés par les items qui les composent. De plus, les échelles de Likert sont graduées selon 4 niveaux seulement (*Pas du tout-Pas assez-Satisfaisant/De manière perfectible-Parfaitement*). Il est donc possible que ces mesures ne soient pas suffisamment fines.

Par conséquent, il serait nécessaire d'améliorer ces questionnaires. Proposer d'évaluer le ressenti de la prestation selon une échelle numérique (e.g., une note de 0 à 20) plutôt qu'une échelle de Likert pourrait peut-être y contribuer. Enfin, comme pour les questionnaires et grilles d'évaluation, il serait nécessaire d'améliorer les questionnaires de ressenti de la prestation en identifiant plus précisément les habiletés concernées par les savoirs qui la composent.

7. Voir discussions p.147

8. Voir discussions p.138

**Holodeck Safran, résultats détaillés de la conscience
de soi, pour les commerciaux**

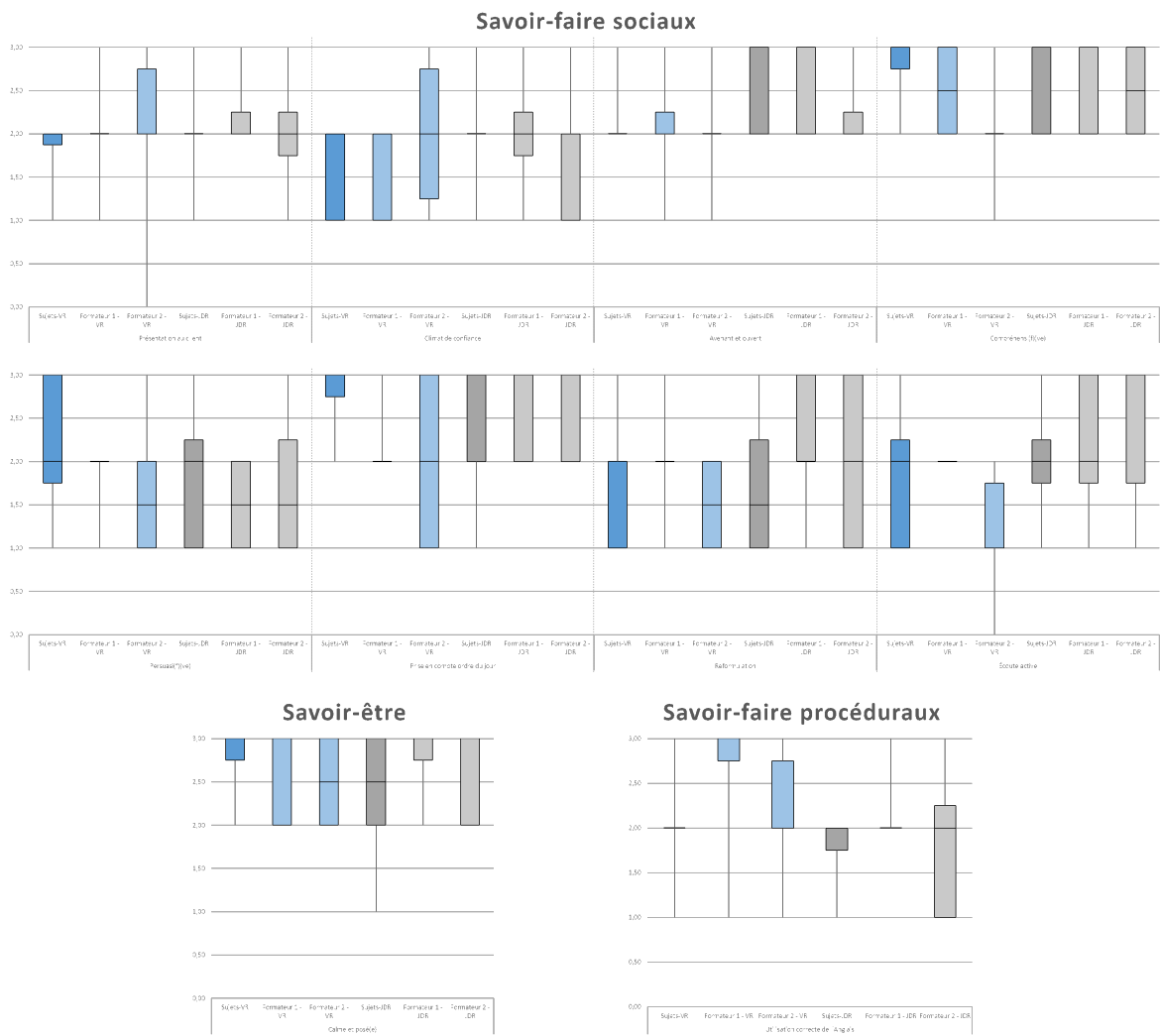


FIGURE 29.1: Résultat des questionnaires de conscience de soi des commerciaux, selon les savoirs concerné

ANNEXE 29. HOLODECK SAFRAN, RÉSULTATS DÉTAILLÉS DE LA CONSCIENCE DE SOI, POUR LES COMMERCIAUX

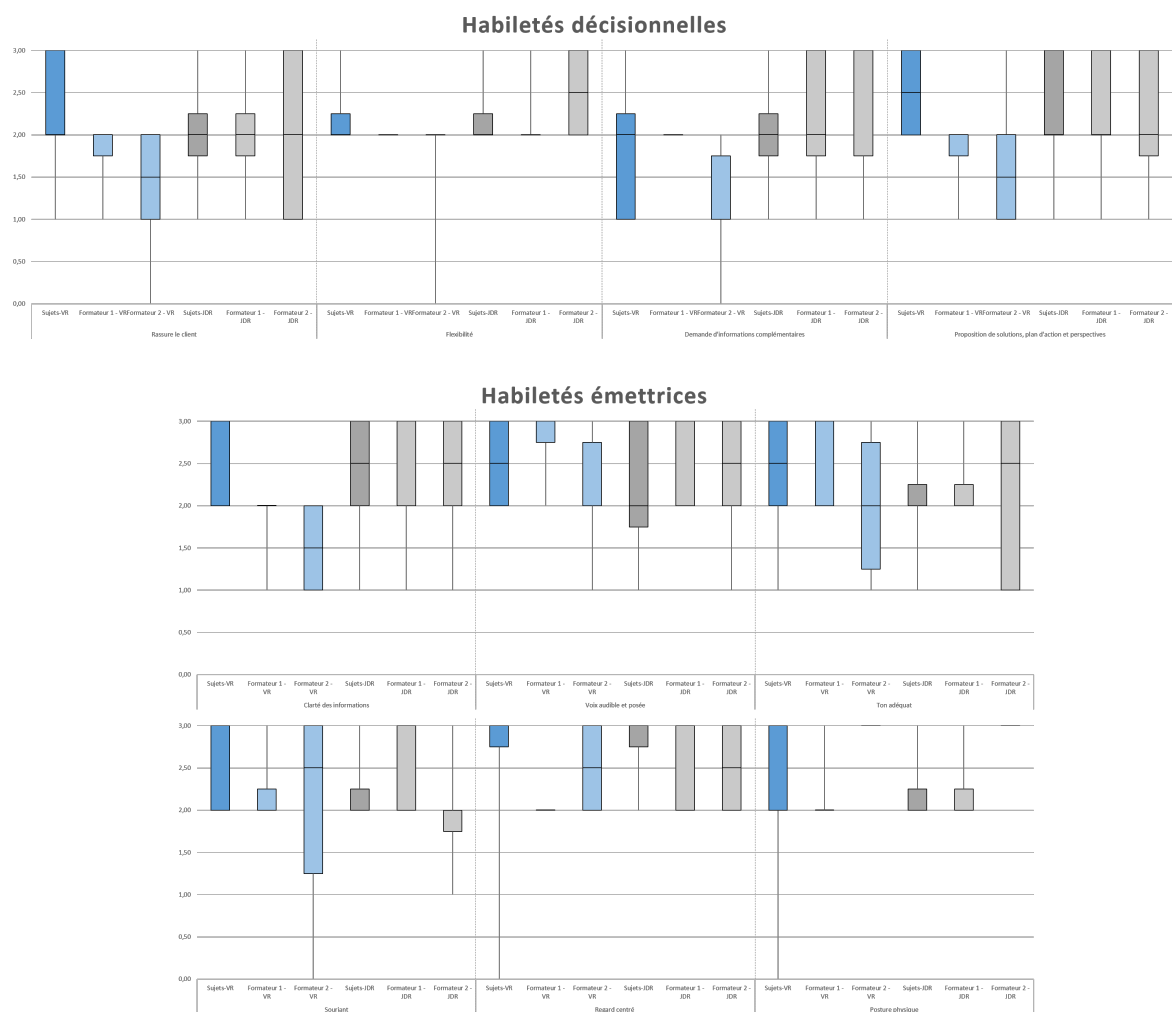


FIGURE 29.2: Résultat des questionnaires de conscience de soi des commerciaux, selon les habiletés concernées

30

**Holodeck Safran, résultats détaillés de la conscience
de soi, pour les managers**

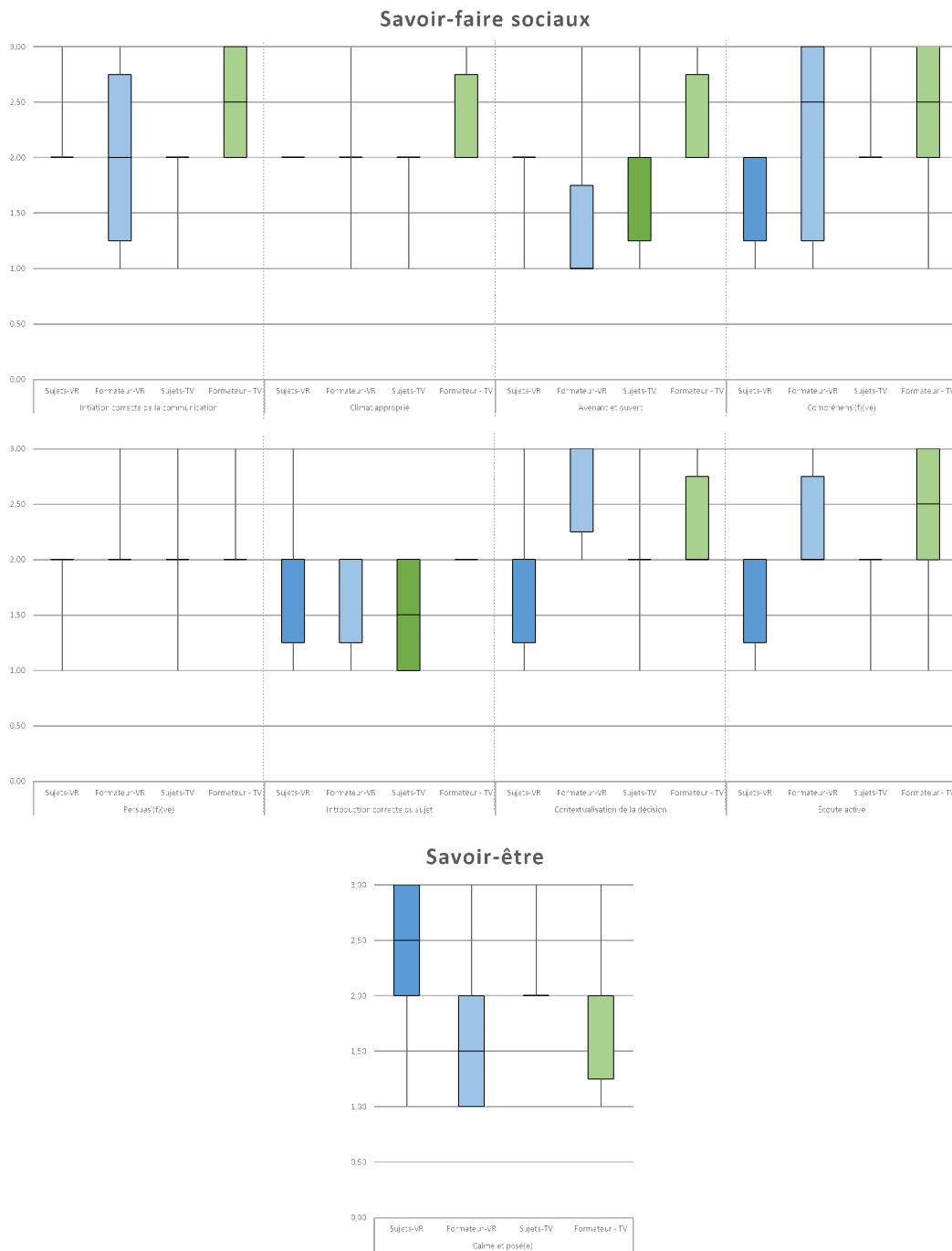


FIGURE 30.1: Résultat de conscience de soi des managers, selon les savoirs concerné

ANNEXE 30. HOLODECK SAFRAN, RÉSULTATS DÉTAILLÉS DE LA CONSCIENCE DE SOI, POUR LES MANAGERS

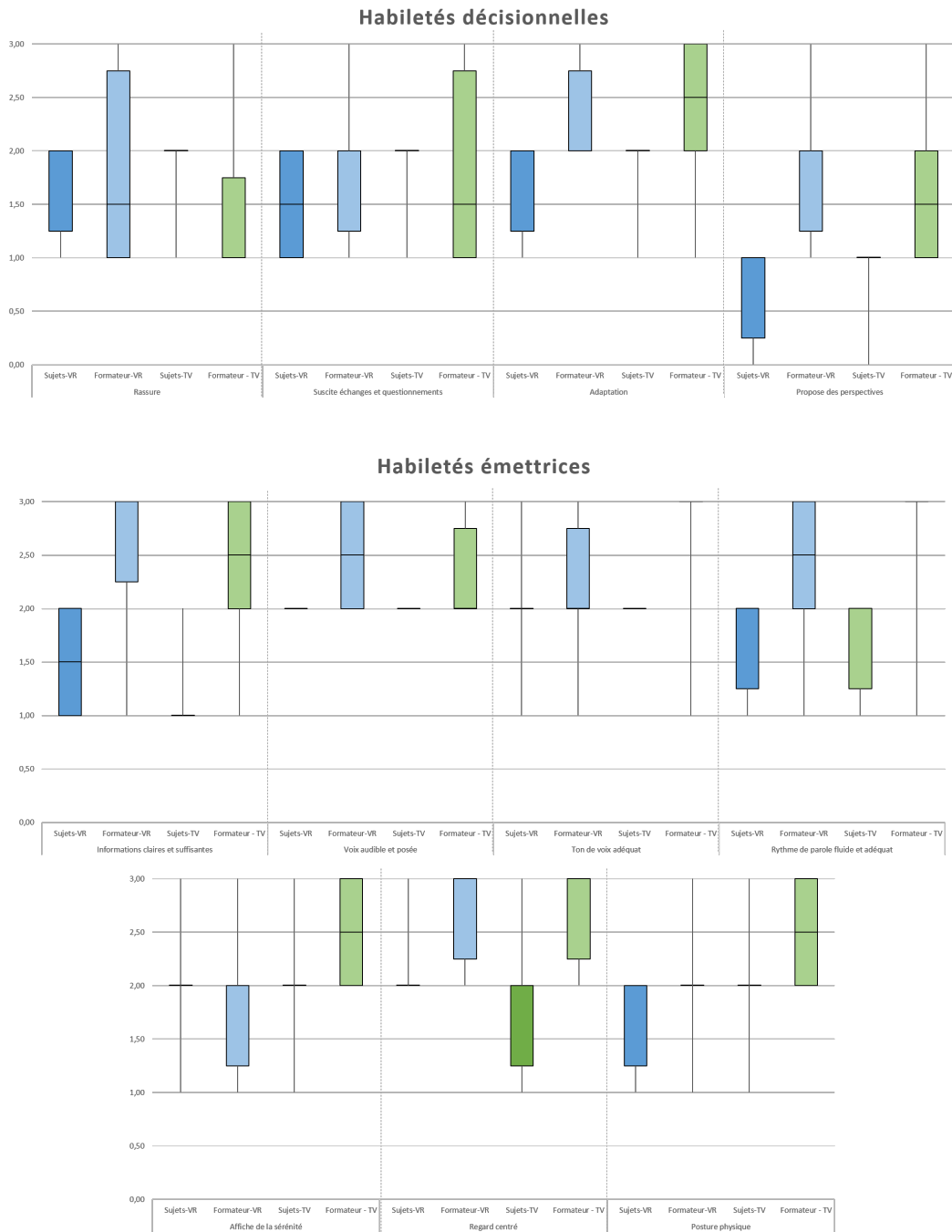


FIGURE 30.2: Résultat des questionnaires de conscience de soi des managers, selon les habiletés concernées

31

Holodeck Safran, étude de la confiance en soi

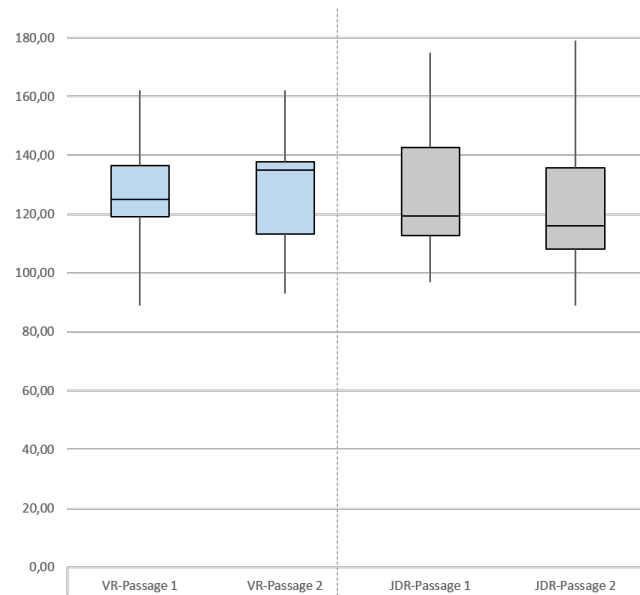


FIGURE 31.1: Résultat des questionnaires de confiance en soi pour la négociation client des les commerciaux

I Méthodologie

Afin de chercher à assurer la cohérence des réponses des questionnaires de confiance en soi, la moitié des items est présentée de manière à correspondre positivement à de la confiance en soi. L'autre moitié des items est au contraire posée de manière négative, i.e. *Pas du tout(0)* correspond ainsi à une forte confiance en soi.

Pour traiter les résultats des questionnaires et obtenir un aperçu global de la confiance en soi des sujets, nous avons calculé un score de confiance en soi en fonction du nombre d'items et des sommes des résultats d'items positifs ($\Sigma_{(+)}$) et négatifs ($\Sigma_{(-)}$).

Le questionnaire de confiance en soi des commerciaux pour la négociation client comportait 48 items. Nous avons donc calculé leur score de confiance en soi (S_{sc}) entre 0 et 192, à partir de la formule :

$$S_{sc} = 96 - \Sigma_{(-)} + \Sigma_{(+)}$$

Pour les managers, le questionnaire de confiance en soi pour les communications d'équipe comprenait quant à lui 50 items. Le score calculé est ainsi compris entre 0 et 200, selon la formule :

$$S_{sc} = 100 - \Sigma_{(-)} + \Sigma_{(+)}$$

Pour chaque population, nous avons voulu comparer les scores de chaque groupe avant et après la première mise en situation.

II Résultats pour les commerciaux, entre Réalité Virtuelle et jeu de rôle présentiel

Les scores issus des résultats des questionnaires de confiance en soi pour la négociation client sont présentés en Figure 31.1.

On observe une amélioration du score médian des sujets ayant utilisé le prototype en Réalité Virtuelle, alors que les scores du groupe passé sur le jeu de rôle présentiel semblent similaires.

Cependant, les tests statistiques ont montré que cette différence n'était pas suffisamment importante pour garantir qu'elle ne soit pas liée au hasard (Wilcoxon rangs signés, $p > 0.05$).

III Résultats pour les managers, entre version visiocasque et version projetée

Les scores obtenus à partir des questionnaires de confiance en soi pour la communication d'équipe sont accessibles en Figure 31.2.

Les scores des sujets ayant utilisé le visiocasque semblent légèrement s'améliorer, alors qu'à l'inverse, ceux du groupe utilisant la version projetée semblent diminuer.

Néanmoins, les tests statistiques n'ont pas non plus permis d'établir ces différences comme significatives (Wilcoxon rangs signés, $p > 0.05$).

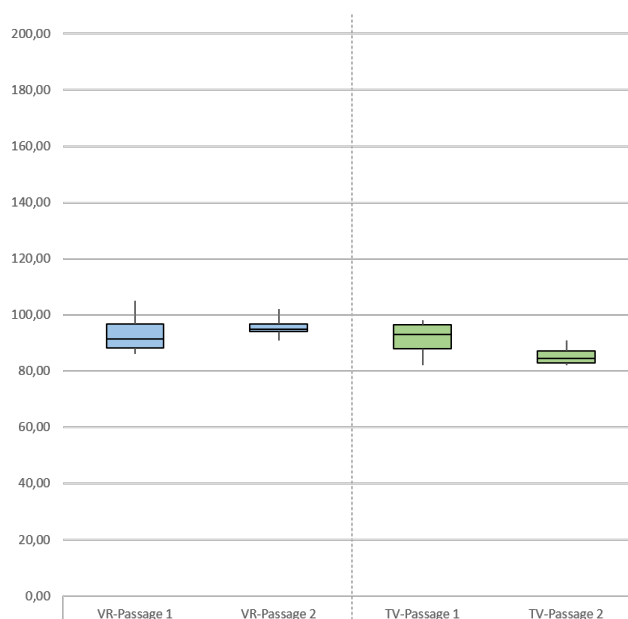


FIGURE 31.2: Résultat des questionnaires de confiance en soi à la communication d'équipe pour les managers

IV Discussions

Les résultats des commerciaux semblent indiquer une amélioration de la confiance en soi des sujets en Réalité Virtuelle, sans que cela ne soit le cas en jeu de rôle présentiel. Cependant cette différence ne s'est pas avérée statistiquement significative.

Des études supplémentaires sont donc nécessaires, sur un échantillon plus large, afin de vérifier la véracité de cet effet. Si tel était le cas, l'utilisation de la Réalité Virtuelle pourrait être une solution intéressante à exploiter pour des apprenants manquant de confiance en eux, notamment pour des néo-apprenants en manque d'expérience.

Les résultats des managers semblent indiquer le même effet lorsque le dispositif utilisé est un visiocasque. En revanche, les résultats semblent indiquer l'effet inverse pour la version projetée. Là encore, ces différences ne se sont pas révélées statistiquement significatives.

De nouvelles expérimentations sur un échantillon plus important seraient là aussi nécessaires afin de confirmer cette observation. Si tel était le cas, il serait alors intéressant d'explorer les pistes d'explications en cherchant des corrélations avec d'autres différences potentielles telles que la sensation de présence. Par exemple, il serait intéressant de chercher des pistes d'explications si une sensation de présence amoindrie était avérée en version projetée. Il serait alors par exemple possible d'émettre l'hypothèse que se sentir moins présent, garder à l'esprit le regard d'observateurs, puisse impacter négativement l'apprenant sur cet aspect.

Il ne faut pas non plus négliger certaines limites de la version projetée du prototype qui peuvent avoir biaisé les résultats. Les lacunes d'interaction sociale précédemment relevées, telles que le fait d'éprouver des difficultés à identifier son interlocuteur, peuvent en effet avoir perturbé et ébranlé les apprenants.

Enfin, une des principales limites de ces résultats concerne les questionnaires utilisés. Réalisés en collaboration avec les formateurs métier, ils s'inspirent de travaux du domaine des sciences humaines sans toutefois n'avoir été éprouvés au préalable. Des travaux supplémentaires sur ces questionnaires seraient donc nécessaire, afin de pouvoir garantir leur pertinence et leur fiabilité.

**Perception des expressions faciales émotionnelles,
étude préliminaire**



FIGURE 32.1: Panneau de sélection des émotions et métaphore d'interaction

Dans la continuité des travaux de l'Holodeck Safran, nous avons donc voulu vérifier si les configurations des expressions faciales émotionnelles étaient pertinentes. Celles-ci ont en effet été établies avec l'outil Morph3D, à partir des blendshapes mis à disposition par l'outil et selon la perception des développeurs¹.

Dans cette étude, nous proposons donc un processus expérimental pour qualifier ces expressions à partir de la perception subjective d'une population de sujets. Nous analysons ensuite les résultats obtenus au cours d'expérimentations, pour lesquelles nous avons appliqué ce processus.

I Processus expérimental

Pour cette étude, nous avons repris la même scène que celle du scénario commerciaux de l'Holodeck Safran².

Comme pour les différentes expérimentations sur l'Holodeck Safran, les sujets étaient tout d'abord briefés sur l'expérimentation, puis équipés d'un visiocasque HTC Vive agrémenté d'un serre-tête *Deluxe Audio Strap*³. L'écart interpupillaire des sujets était également mesuré au préalable et le visiocasque était réglé en fonction de leur morphologie.

Après un petit laps d'adaptation avec l'environnement virtuel, un opérateur lançait l'expérimentation en faisant apparaître un personnage virtuel. Une expression faciale émotionnelle était dessinée sur son visage.

Les sujets devaient alors indiquer l'émotion qu'ils percevaient. Pour cela, un panneau de sélection était disposé entre le personnage virtuel et eux (Figure 32.1). Il leur était ainsi possible de pointer puis cliquer sur des émoticônes représentant les six émotions possibles (Figure 32.2), en utilisant le contrôleur du visiocasque (*Vive Controller*⁴). À noter que les sujets avaient été sensibilisés à la signification des émoticônes via une notice d'information lors du briefing.

Lorsque le sujet sélectionnait une émotion, un fondu laissait apparaître un nouveau personnage avec une autre expression faciale émotionnelle. Toutes les expressions faciales émotionnelles défilaient ainsi de manière aléatoire, sur deux personnages : un masculin (*Aitor*) et un féminin (*Mari*). Comme c'était le cas pour l'Holodeck Safran, les valeurs des blendshapes Morph3D étaient les mêmes pour les deux personnages. Enfin, les personnages étaient tous animés de la même manière, adoptant une posture d'attente⁵.

Les sujets procédaient donc ainsi jusqu'à ce que toutes les expressions faciales émotionnelles aient été évaluées. Selon les niveaux d'intensité, il y avait donc 42 expressions faciales à parcourir, soit 21 pour chaque personnage : 1 niveau d'expression *Neutre*⁶, ainsi que 4 niveaux pour les expressions *Content(e)*, *Mécontent(e)*, *En colère*, *Surpris(e)* et *Sceptique*. Les valeurs des différents niveaux ont été établies de manière linéaire par les développeurs⁷.

Enfin, les temps de réponse des sujets étaient enregistrés afin de pouvoir les analyser. Il est important de noter qu'ils ne disposaient pas de limite de temps. Ils pouvaient ainsi prendre tout le temps qu'ils jugeaient nécessaire avant de prendre

1. Les blendshapes Morph3D utilisés pour chaque émotion sont disponibles en Annexe 33 (p.337)

2. Voir Chapitre 4, p.122

3. Voir Figure 4.33, p.131

4. <https://www.vive.com/eu/accessory/controller/>

5. Animation *Idle* de la bibliothèque *Mixamo* (<https://www.mixamo.com/#/>)

6. Pour l'expression *Neutre*, tous les blendshapes avaient pour valeur 0

7. Voir valeurs en Annexe 33 (p.337)

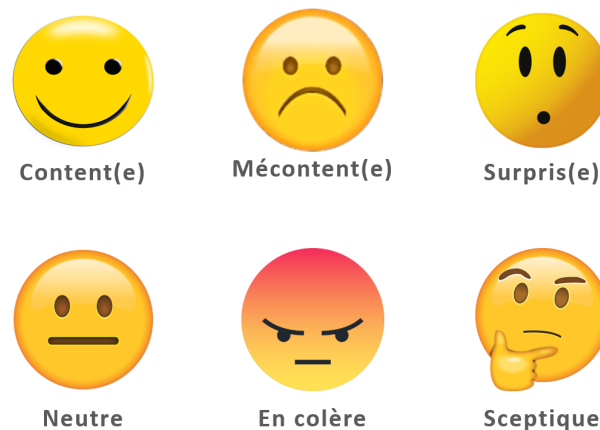


FIGURE 32.2: Signification des différents émoticônes pouvant être sélectionnés

une décision.

Cependant, nous n'avons pas pris en compte les temps de réponse de la première émotion choisie par chaque sujet lors du traitement des résultats. Nous avons ainsi souhaité éviter d'éventuels biais. Lors des expérimentations, nous avons en effet observé que les sujets marquaient un temps d'observation plus important en découvrant le personnage virtuel pour la première fois.

II Sujets

Nous avons conduit ces expérimentations sur 54 collaborateurs de Capgemini.

Les sujets étaient composés à 63% d'hommes pour 37% de femmes. Leur moyenne d'âge était de 36 ans (± 10) et 74.1% d'entre eux avait déjà vécu une première expérience en Réalité Virtuelle auparavant.

III Résultats

Avant d'analyser nos résultats, nous émettons le postulat qu'une expression faciale émotionnelle est efficacement dessinée lorsqu'elle est correctement et spontanément perçue. Nous identifions donc deux critères permettant de qualifier nos expressions :

- la **correction** de la perception, i.e. lorsque l'émotion est perçue comme non-neutre et qu'elle n'est pas confondue avec une autre émotion.
- la **spontanéité** de la perception, i.e. lorsque la prise de décision est rapide, qu'elle ne laisse place qu'à peu d'hésitations.

Nous nous efforcerons donc d'analyser ces deux critères lors de l'analyse des résultats.

Méthodologie

Afin d'analyser la perception de la population de sujets, nous proposons d'appliquer la méthode suivante pour chaque expression de chacun des personnages :

1. Analyser la correction, via les taux d'erreur.

En analysant les taux d'erreur selon les différents niveaux et les différents personnages, nous souhaitons analyser la correction de la perception des expressions dessinées. Des taux d'erreur suffisamment bas permettraient de valider ce critère.

2. Analyser la correction en étudiant la répartition des réponses.

Lorsque nous relevons des différences et/ou des taux d'erreur trop élevés, nous analysons la répartition des réponses des sujets.

Si les réponses varient de manière importante vers une autre émotion perçue, alors les lacunes dans la correction de la perception peuvent provenir d'une mauvaise manière de dessiner l'expression faciale émotionnelle.

En revanche, si les réponses fausses se dirigent plutôt vers l'émotion *Neutre*, des insuffisances dans la définition des niveaux d'intensité peuvent avoir impacté la correction de la perception.

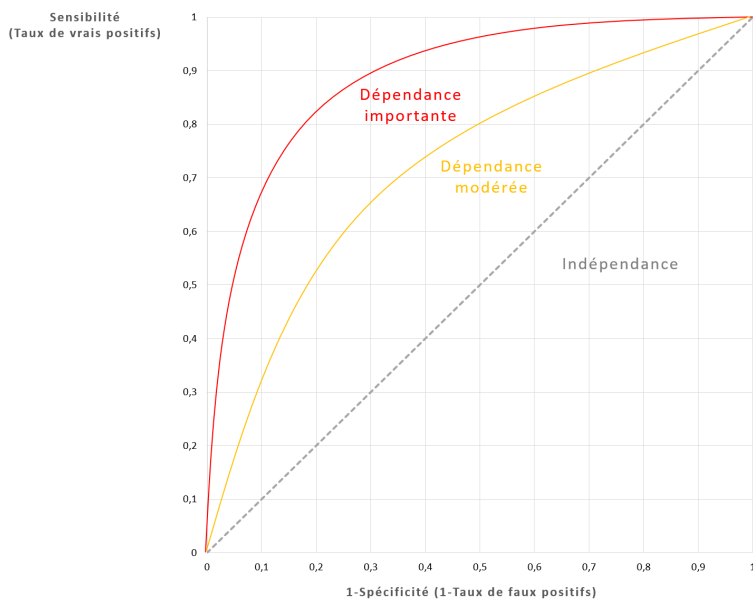


FIGURE 32.3: Exemple de courbes ROC

3. Analyser la spontanéité de la perception, à partir des temps de réponse.

Pour comparer la spontanéité de la perception des sujets entre les différents personnages, nous chercherons à voir si des différences peuvent être observées. Si tel est le cas, nous chercherons à voir si ces différences sont statistiquement significatives, en utilisant des tests statistiques, conformément à la méthodologie pour la comparaison d'échantillons indépendants que nous avons précédemment présenté⁸.

4. Analyser la spontanéité des perceptions correctes.

Nous proposons d'évaluer la pertinence des expressions faciales émotionnelles en mesurant la spontanéité des perceptions correctes des sujets.

Pour cela, nous chercherons au préalable d'établir s'il y a une dépendance entre les temps de réponse et les taux d'erreur. Nous souhaitons ainsi analyser la dépendance entre les variables *Temps de réponse* (variable quantitative continue) et *Erreur* (booléen, variable qualitative dichotomique). Nous proposons donc de le vérifier en utilisant une *courbe ROC*.

Une courbe ROC (*Receiver Operating Characteristic*) permet en effet de mesurer la performance d'un classificateur binaire (e.g. *Erreur*) en fonction d'un seuil de discrimination (e.g. *Temps de réponse*).

Pour chaque seuil de discrimination, elle consiste à représenter son score de pertinence selon son taux de vrais positifs (ou Sensibilité, i.e. $!Erreur \ \& \ Temps \ de \ réponse \leq \ seuil$), en fonction de sa Spécificité (ou $1 -$ taux de faux positifs, e.g. $1 - !Erreur \ \& \ Temps \ de \ réponse < \ seuil$).

En observant la courbe ROC, il est donc possible d'analyser la dépendance entre les deux variables (Figure 32.3).

Si la courbe ROC nous permet d'observer un lien entre le fait de répondre correctement et celui de mettre peu de temps à répondre, alors nous proposons d'évaluer la validité de nos expressions faciales émotionnelles en analysant la spontanéité des réponses justes, que nous appellerons *Spontanéité des Perceptions Correctes (SPC)*.

Ainsi, nous formulerons le postulat qu'une expression faciale émotionnelle est mieux perçue qu'une autre, si nous observons de manière plus marquée des réponses correctes prononcées rapidement.

Nous analyserons la Spontanéité des Réponses Correctes (SPC) en représentant le taux de réponses correctes (i.e. $!Erreur \ \& \ Temps \ de \ réponse$ inférieurs ou égaux), en fonction des *Temps de réponse* relevés pour chaque évaluation (Figure 32.4).

Dans les paragraphes suivants, nous appliquerons donc cette méthodologie en analysant consécutivement la correction et la spontanéité de la perception des sujets. Nous chercherons tant à observer si des différences sont visibles entre les personnages, qu'entre les expressions elles-mêmes.

Résultats : correction de la perception

Les expérimentations ont montré des taux d'erreur différents selon les émotions représentées par les expressions faciales.

8. Voir Chapitre 2, paragraphe *Méthodologie pour la comparaison d'échantillons indépendants* (p.60)

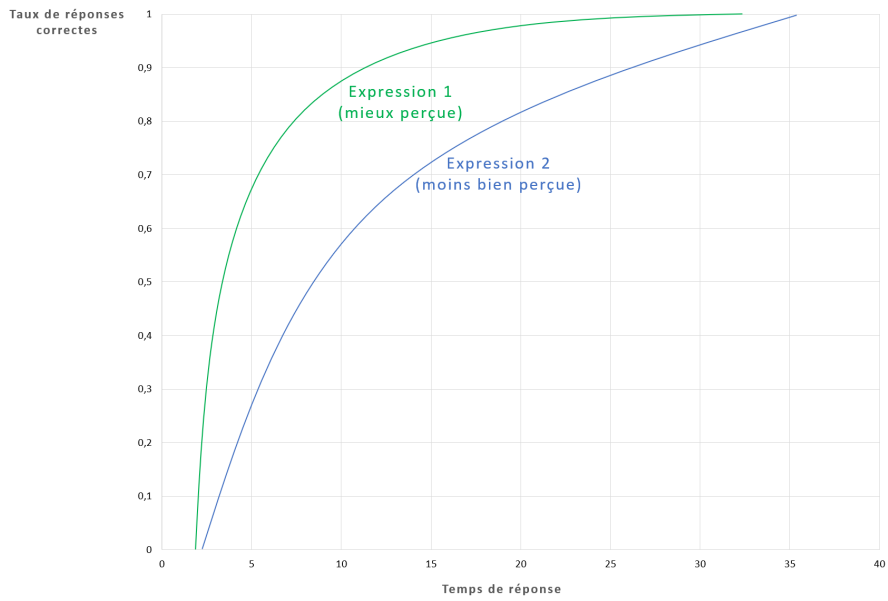


FIGURE 32.4: Exemple de courbes SPC (*Spontanéité des Perceptions Correctes*)

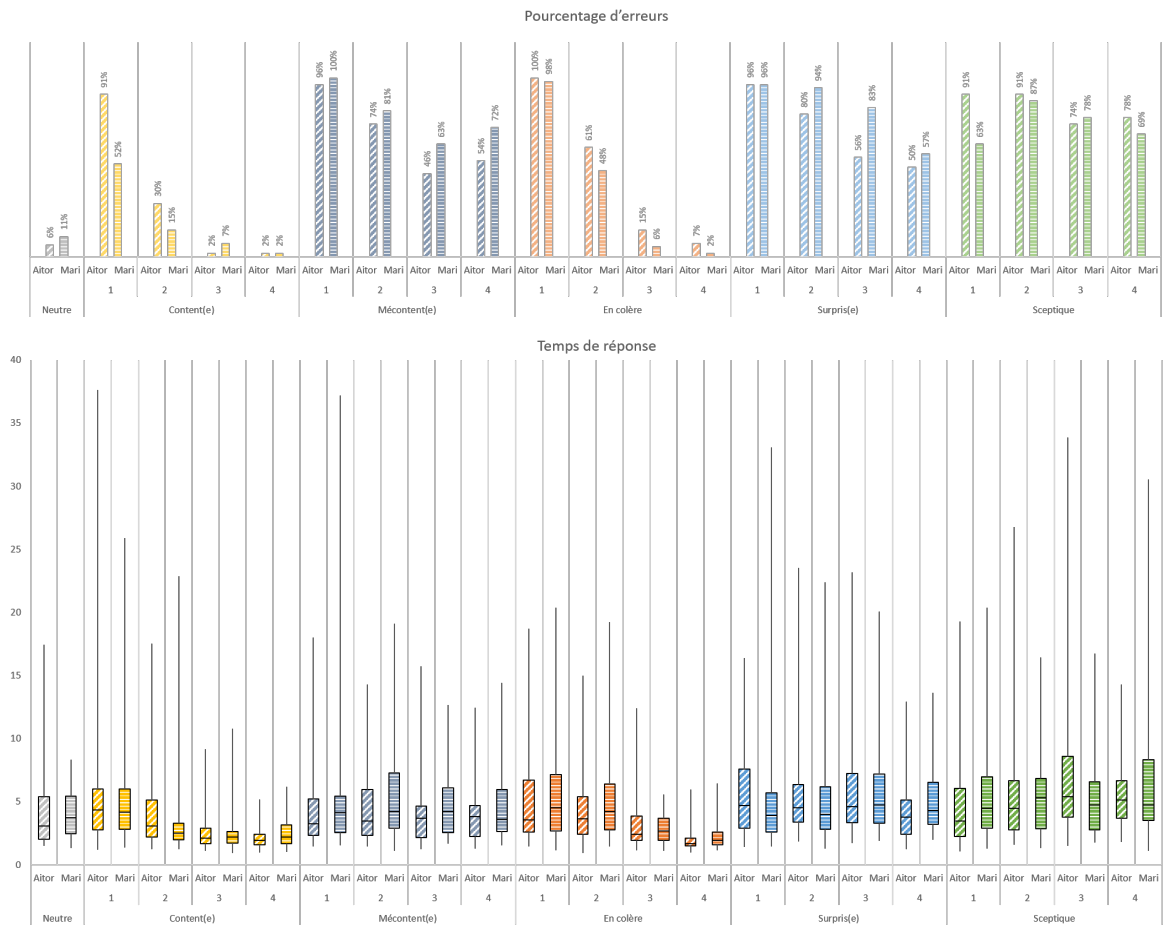


FIGURE 32.5: Pourcentages d'erreur et temps de réponse selon les personnages Aitor (masculin) et Mari (féminin)

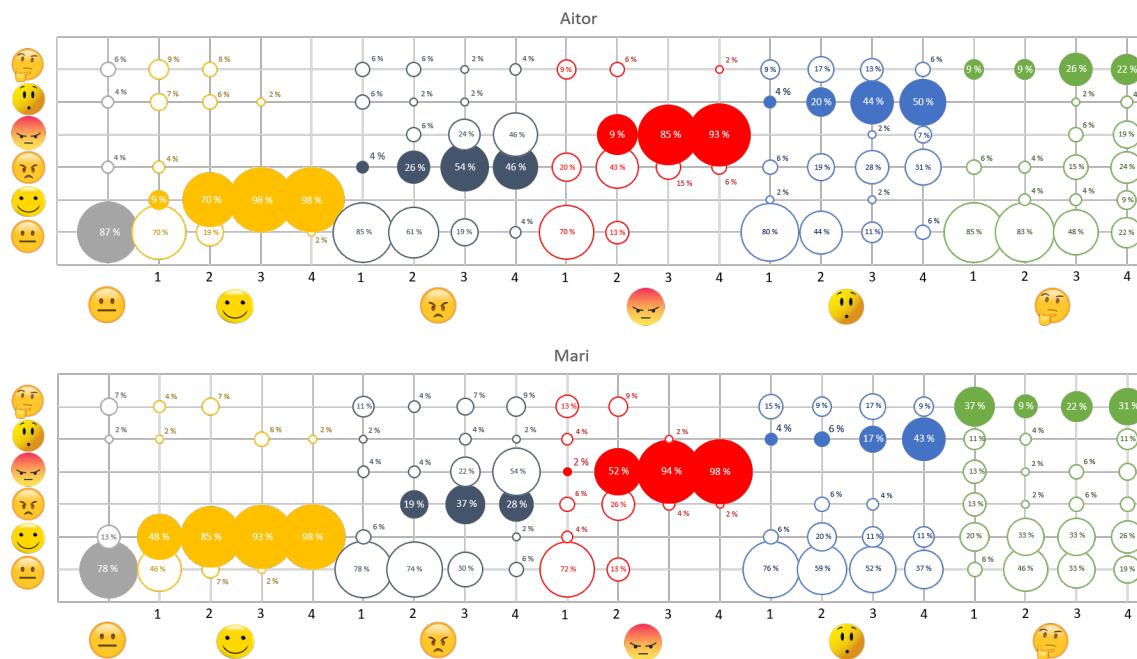


FIGURE 32.6: Réponses des sujets pour les personnages Aitor (masculin) et Mari (féminin)

L'expression *Neutre* montre un faible taux d'erreur (Figure 32.5).

Content(e) montre quant à elle des taux d'erreur élevés pour le premier niveau d'intensité (Figure 32.5). Ce taux d'erreur diminue pour les niveaux suivants, avec cependant un pourcentage relativement élevé pour le niveau 2. Lorsqu'on analyse la répartition des réponses pour cette expression, on observe que les sujets l'ont perçue comme *Neutre* pour ces deux premiers niveaux (Figure 32.6). Il semble cependant que cet effet soit moins marqué face au personnage féminin (Mari).

Nous observons également un taux élevé d'erreurs pour les deux premiers niveaux d'intensité de l'expression *En colère*, puis une diminution importante de ce pourcentage pour les deux derniers niveaux (Figure 32.5). La répartition des réponses montre également un pourcentage important de perceptions *Neutre* pour le premier niveau d'intensité (Figure 32.6). Pour le personnage masculin (Aitor), une part non négligeable des sujets a en revanche perçu l'expression *Mécontent*. Pour le 2^{ème} niveau d'intensité cet effet semble s'amplifier pour les deux personnages.

Enfin, pour les expressions *Mécontent(e)*, *Surpris(e)* et *Sceptique*, une diminution des taux d'erreur est observable mais ceux-ci restent très élevés sur chaque niveau d'intensité (Figure 32.5).

Les sujets semblent avoir perçu l'expression *Mécontent(e)* comme *Neutre* pour les deux premiers niveaux d'intensité (Figure 32.6). Pour les deux derniers niveaux, les erreurs semblent en revanche se diriger vers l'expression *En colère*. L'expression faciale représentant la *Surprise* a également été beaucoup plus perçue comme *Neutre* sur les deux premiers niveaux d'intensité du personnage masculin (Aitor). Sur les deux derniers, les sujets semblent avoir eu plutôt tendance à se tromper en sélectionnant l'expression *Mécontent(e)*. Pour le personnage féminin (Mari), les sujets semblent en revanche avoir perçu l'expression comme *Neutre* sur les quatre niveaux d'intensité.

L'expression *Sceptique* montre également des résultats différents selon le personnage. Pour Aitor, les sujets ont eu tendance à percevoir l'expression comme *Neutre* sur les trois premiers niveaux d'intensité. Sur le dernier niveau, les choix semblent en revanche plus distribués, avec une tendance plus importante pour les expressions *En colère*, *Mécontent* et *Neutre*. L'expression sur Mari a au contraire été plus perçue comme *Neutre* sur les 2^{ème} et 3^{ème} niveaux d'intensité. Pour le premier et le dernier niveaux, les choix sont plus équilibrés entre les différentes possibilités, avec une tendance plus importante pour la bonne réponse.

Résultats : spontanéité de la perception

En observant les résultats des temps de réponse (Figure 32.5), on constate qu'ils semblent être relativement similaires entre les deux personnages.

On peut également relever que ceux-ci semblent liés aux pourcentages d'erreurs. Lorsque les sujets se trompent moins, ils semblent mettre moins de temps à prendre leur décision. À l'inverse, plus le taux d'erreur est important, plus le temps de décision semble l'être également.

Afin de vérifier cette observation, nous avons donc dessiné la courbe ROC à partir des choix des sujets, tous personnages et émotions confondus, ce qui représente 2214 évaluations. La courbe ROC montre une dépendance modérée entre le *Temps de réponse* et le fait de commettre ou non une *Erreur* (Figure 32.7).

Du fait de cette dépendance modérée entre la perception de la bonne émotion et la prise de peu de temps à répondre, nous avons donc dessiné la courbe SPC propre à chaque émotion, pour tous personnages confondus (Figure 32.8). On

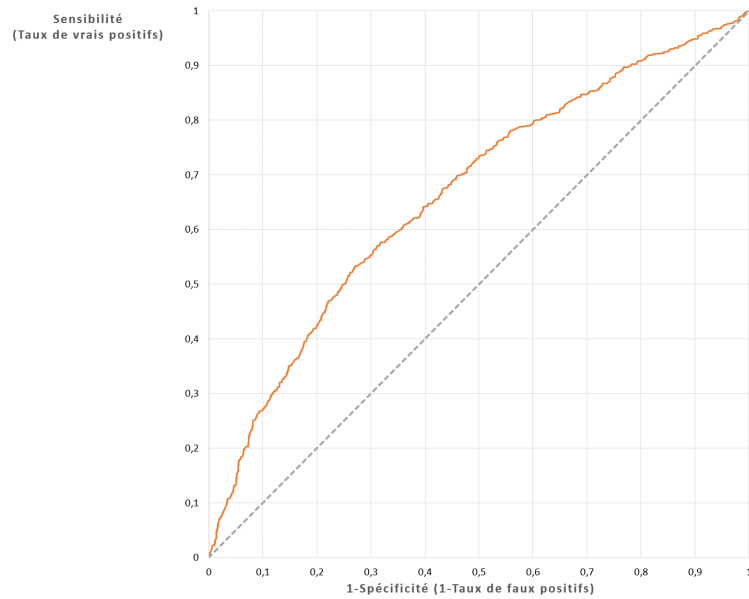


FIGURE 32.7: Courbe ROC des évaluations, toutes expressions confondues

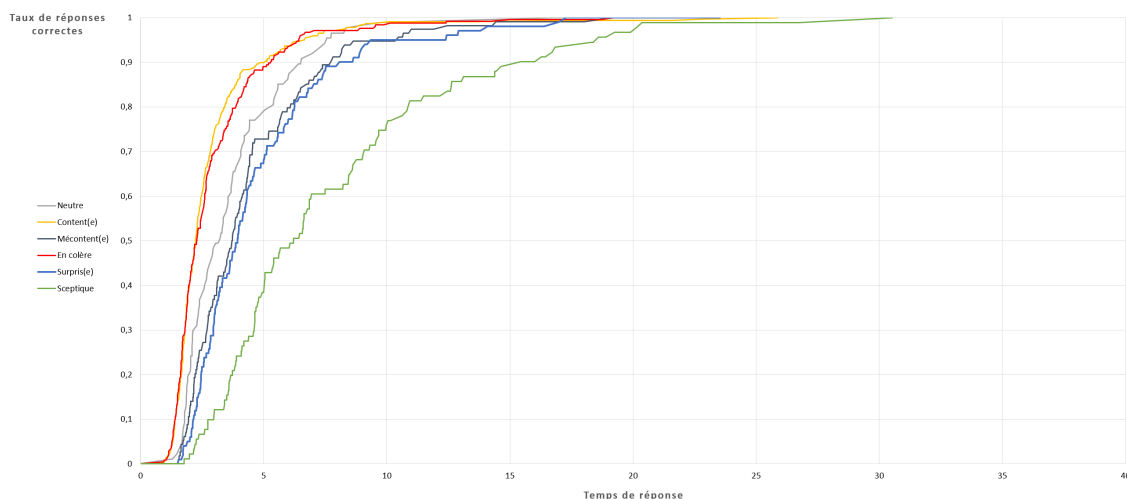


FIGURE 32.8: Courbes SPC (*Spontanéité des Perceptions Correctes*) des évaluations selon chaque émotion, tous personnages confondus

observe que certaines d'entre-elles semblent indiquer une *Spontanéité des Perceptions Correctes* moins importante. Les expressions faciales émotionnelles *Content(e)* et *En colère* montrent des spontanités plus ou moins similaires. *Neutre*, *Surpris(e)* et *Mécontent(e)* semblent en revanche indiquer des résultats relativement moins spontanés. Enfin, l'expression *Sceptique* montre une spontanité clairement moindre par rapport aux autres expressions. Dans le paragraphe précédent, nous avons observé que certains résultats différaient selon le personnage (masculin/féminin).

Nous avons donc souhaité analyser la *Spontanéité des Perceptions Correctes* indépendamment pour chaque personnage. Nous avons ainsi dessiné les courbes SPC pour chaque émotion, selon le personnage évalué (Figure 32.9).

Certaines différences peuvent y être observées.

La spontanité semble relativement plus importante pour l'expression *Mécontent(e)* d'Aitor que celle de Mari (Figure 32.10).

Pour l'expression *Surprise* en revanche, la spontanité semble plus importante pour Mari.

Enfin, les résultats semblent relativement similaires pour les autres expressions faciales émotionnelles⁹.

Discussions

Nous avons donc étudié la correction et la spontanité de la perception de nos expressions faciales émotionnelles.

9. Toutes les courbes SPC comparant les personnages sont accessibles en Annexe 34

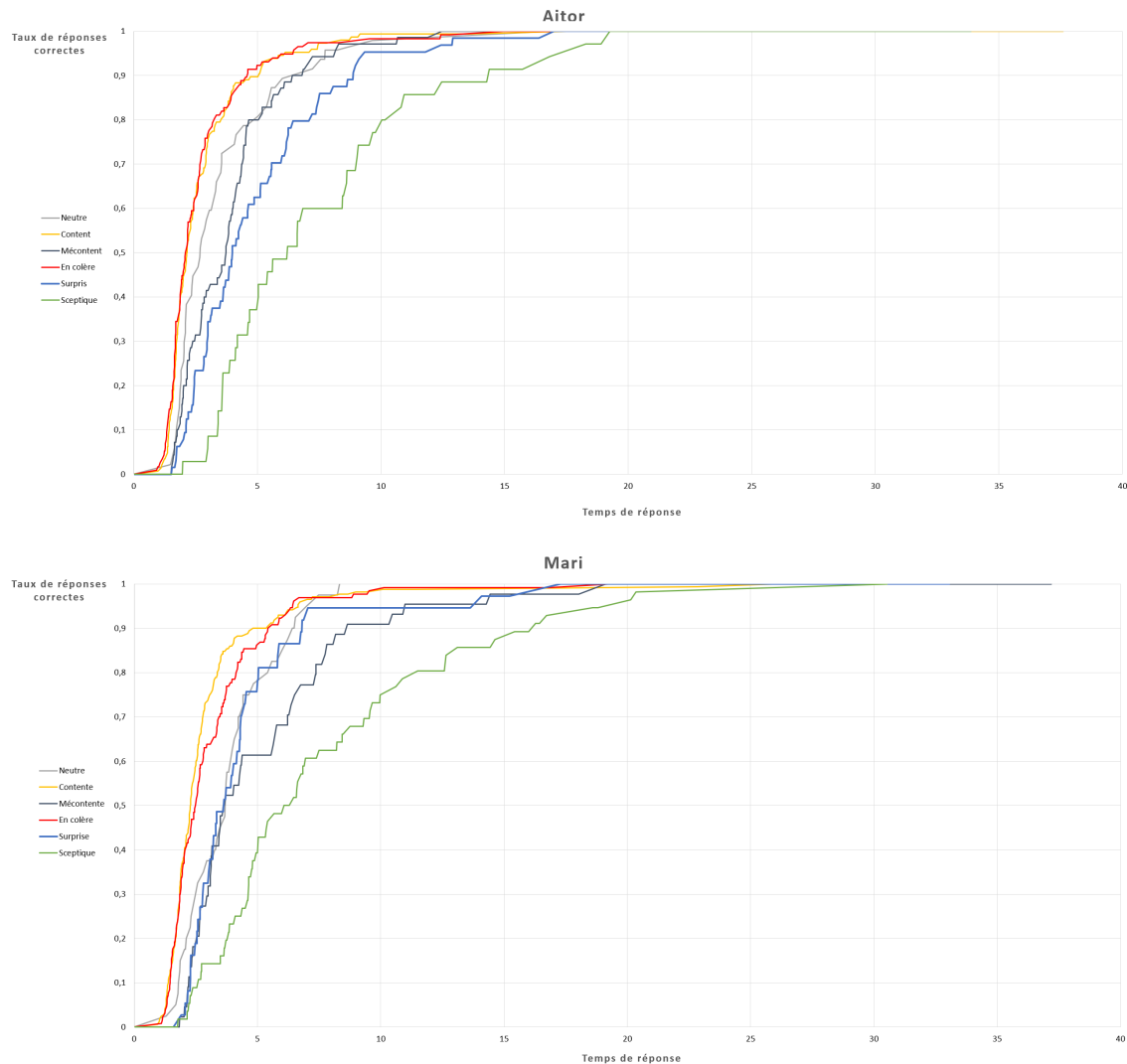


FIGURE 32.9: Courbes SPC pour chaque expression, selon les personnages masculin (Aitor) et féminin (Mari)

Pour la spontanéité, nous avons notamment pu observer que le fait de percevoir la bonne émotion et celui de prendre peu de temps à répondre étaient modérément dépendants. Cela nous a permis de proposer et d'utiliser une méthode pour observer et analyser la *Spontanéité des Perceptions Correctes* de chaque émotion.

Les expressions *Neutre*, *Content(e)* et *En colère* ont montré une correction contrastée.

Nous avons en effet observé un faible taux d'erreurs sur l'expression *Neutre*, ainsi que pour les deux derniers niveaux d'intensité de *Content(e)* et en *En colère*. Cependant, pour ces deux dernières expressions, les taux d'erreur restent importants sur les premiers niveaux d'intensité. Pour ceux-là, la répartition des choix indique que les sujets ont eu trop tendance à percevoir l'expression comme *Neutre*. Ces résultats nous permettent de relever que la définition des niveaux d'intensité, établis de manière linéaire et empirique par les développeurs à l'aide d'outils à leur disposition, n'est pas satisfaisante. Le début de la perception correcte de l'expression *Content(e)* semble en effet n'être établi qu'à partir du deuxième niveau d'intensité.

Les spontanéités des expressions *Content(e)* et *En colère* se sont montrées similaires entre elles et meilleures que pour les autres expressions. Celle de l'expression *Neutre* s'est avérée moins importante. Nous supposons que ce soit lié au fait que les sujets, ne percevant pas d'émotion, aient pris un peu plus de temps avant de réaliser que l'expression est *Neutre*.

Les expressions *Mécontent(e)*, *Surpris(e)* et *Sceptique* ont montré de mauvais résultats de correction.

Si *Mécontent(e)* et *Surpris(e)* montrent une réduction des taux d'erreur après les premiers niveaux d'intensité, leur taux restent néanmoins trop élevés. Pour l'expression *Mécontent(e)*, les perceptions erronées semblent se diriger vers *Neutre* pour les premiers niveaux d'intensité, les erreurs semblent en revanche se diriger vers l'émotion *En colère*, ce qui suggère une ambiguïté sur la manière dont a été dessinée cette émotion. L'expression *Surpris(e)* montre quant à elle des perceptions *Neutre* ou *Mécontent(e)*, selon si le personnage est féminin ou masculin. Enfin, outre un fort taux d'erreur sur tous les niveaux d'intensité, l'expression *Sceptique* a été plutôt perçue comme *Neutre* pour le personnage masculin. Pour le personnage féminin, les perceptions erronées semblent en revanche plus distribuées sur les différents choix d'émotion.

ANNEXE 32. PERCEPTION DES EXPRESSIONS FACIALES ÉMOTIONNELLES, ÉTUDE PRÉLIMINAIRE

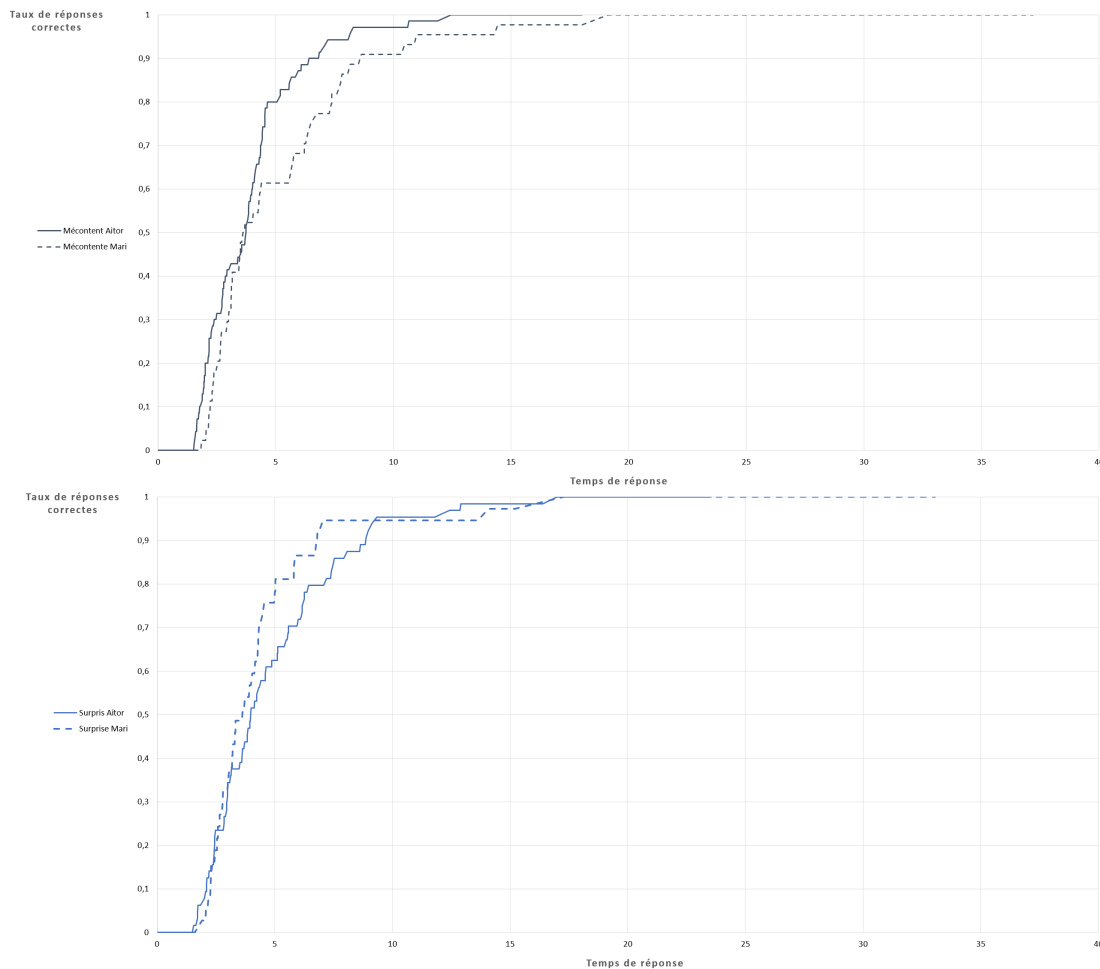


FIGURE 32.10: Courbes SPC des expressions pour lesquelles des différences sont observées (), selon les personnages

Les expressions *Mécontent(e)* et *Surpris(e)* montrent des spontanités similaires, mais restent cependant moins bonnes que *Content(e)* et *En colère*. La *Spontanité des Perceptions Correctes* de l'expression *Sceptique* est quant à elle nettement moins bonne que pour les autres émotions.

Les résultats pour ces trois expressions ne sont pas satisfaisants et ne permettent pas de garantir leur pertinence. Les résultats concernant les premiers niveaux d'intensité viennent à nouveau souligner les lacunes de la définition des niveaux d'intensité. Les autres perceptions erronées que *Neutre* montrent également que la manière dont ont été dessinées ces émotions a généré des ambiguïtés dans la perception.

Comme nous venons de le mentionner, nous observons certaines différences en fonction du personnage.

Pour le premier niveau de l'expression *Content(e)*, le personnage féminin montre des résultats nettement moins *Neutre* que le personnage masculin. Il semble ainsi avoir été perçu comme naturellement plus jovial que le personnage masculin. Nous avons aussi observé des *Spontanités des Perceptions Correctes* relativement plus importantes pour les expressions *Mécontent(e)* du personnage masculin et *Surprise* du personnage féminin.

Une des explications possibles peut provenir du modèle 3D de base utilisé pour chaque personnage. Il est possible que la manière dont le maillage et les textures ont été définies par l'outil Morph 3D puisse biaiser la perception d'un personnage à l'autre. Pour vérifier cette hypothèse, des expérimentations supplémentaires seraient nécessaires. Il pourrait ainsi être intéressant de comparer la perception d'expressions dessinées de la même manière, sur des modèles différents de même sexe. Si cette hypothèse venait à être confirmée, il serait alors peut être pertinent de produire une étude visant à évaluer le niveau de "neutralité" des différents modèles disponibles, avant de concevoir tout outil de formation pour lequel la perception d'expressions faciales émotionnelles jouerait un rôle important.

Une des autres possibilités pourrait provenir de variations en fonction du sexe des sujets et celui des personnages. Nous avons en effet effectué des expérimentations sur une population présentant un déséquilibre de proportion hommes/-femmes (63%/37%). Or, comme nous l'avons précédemment mentionné, les expressions faciales émotionnelles constituent une composante principale de l'interaction sociale et certains travaux de la littérature ont souligné l'effet du sexe des sujets lors de l'interaction avec une machine. Il est donc possible que les résultats indiquant des différences entre les personnages aient été impactés par des variations inter-sexes.

Nous avons donc produit une étude de ces variations inter-sexes¹⁰.

Les résultats de cette étude ont permis d'émettre les hypothèses suivantes :

- le début de la perception du contentement diffère en fonction du sexe,
- les sujets masculins ont tendance à percevoir de la colère plutôt que du mécontentement,
- les sujets féminins ont à l'inverse tendance à percevoir du mécontentement plutôt que de la colère.

Si ces hypothèses venaient à se confirmer, la question de faire varier la manière de dessiner les expressions faciales émotionnelles, en fonction des proportions d'hommes et femmes de la population d'apprenants, pourrait se poser afin de garantir la pertinence de l'outil d'apprentissage. Nous avons donc souhaité analyser à nouveau ces effets dans la poursuite de nos travaux.

Enfin, il est important de souligner que nos résultats puissent avoir été influencés par l'utilisation d'émoticones pour sélectionner l'émotion perçue. En effet, même si les sujets ont été brièvement sensibilisés à leur signification, il est possible que leur perception et leur interprétation puisse avoir biaisé nos résultats.

Nous chercherons donc à éviter cet effet potentiel dans la suite de nos travaux, en préférant utiliser par exemple des labels précisant le nom de l'émotion.

IV Conclusions de l'étude préliminaire

Dans cette étude, nous avons proposé un processus expérimental et une méthodologie afin d'analyser si les expressions faciales émotionnelles des personnages virtuels de l'Holodeck Safran avaient été dessinées de manière optimale. Basé sur une évaluation subjective des expressions par une population cible, nous avons donc appliqué ce processus au cours d'expérimentations. Nous avons ensuite présenté et analysé les résultats selon la méthodologie proposée.

Ces résultats nous ont permis d'établir que nos expressions, dessinées à l'aide de l'outil Morph3D selon la perception des développeurs, étaient établies de manière insatisfaisante. Outre le dessin de l'expression faciale, la méthode de définition des niveaux d'intensité a aussi montré des lacunes.

Il est donc nécessaire de revoir ces expressions faciales émotionnelles, afin de garantir leur pertinence et celle de l'outil d'apprentissage les utilisant.

Nous chercherons donc à analyser la littérature, afin d'établir s'il existe des manières standardisées de dessiner des expressions faciales émotionnelles pour chacune de ces émotions identifiées.

Nous chercherons également à voir si des méthodes permettant de fixer des niveaux d'intensité sont présentes dans la littérature.

Nous analyserons aussi la littérature afin d'analyser si d'autres méthodes d'évaluation subjective d'expressions faciales émotionnelles y sont proposées.

À l'issue de cette analyse de la littérature, nous chercherons donc à modifier le dessin des expressions, puis à conduire de nouvelles expérimentations permettant de les qualifier.

Lors de cette étude, nous avons proposé une méthodologie d'analyse des résultats, en qualifiant notamment les expressions faciales émotionnelles sur deux critères : la correction et la spontanéité.

Pour analyser la spontanéité, nous avons suggéré d'observer la dépendance entre le fait de répondre juste et celui de prendre peu de temps. Pour cela, nous avons proposé d'utiliser des courbes ROC. Lorsque cette dépendance est constatée, nous avons alors introduit et soumis l'idée d'utiliser une méthode permettant de comparer la *Spontanéité des Perceptions Correctes (SPC)* des expressions faciales émotionnelles.

En appliquant cette méthodologie, nous avons aussi observé des variations de la perception des expressions, selon le personnage sur lequel elles avaient été dessinées.

Ces résultats nous ont amené à nous interroger au sujet de l'impact du modèle 3D de base, sur la perception des expressions. Lors de travaux futurs, il serait intéressant de produire d'autres expérimentations. Il pourrait en effet être nécessaire d'analyser si certaines caractéristiques des modèles induiraient plus naturellement la perception de certaines émotions.

Nous avons également observé des variations en fonction du sexe des sujets.

Cependant, ces variations peuvent avoir été influencées par les lacunes dans la manière de dessiner les expressions et d'en fixer les niveaux d'intensité. Lorsque nous aurons établi une manière pertinente pour dessiner les émotions, puis qualifié leur pertinence, il serait intéressant de voir si nous observons les mêmes effets.

Il pourrait être notamment nécessaire d'observer si le début de la perception varie en fonction du sexe des sujets, tout comme établir si les perceptions de la colère et du mécontentement tendent à varier en fonction du sexe des sujets.

10. La méthodologie pour l'étude des variations inter-sexes et ses résultats sont disponibles en Annexe 35

**Holodeck Safran, expressions faciales émotionnelles
dessinées avec Morph3D et valeurs des blendshapes
utilisés**

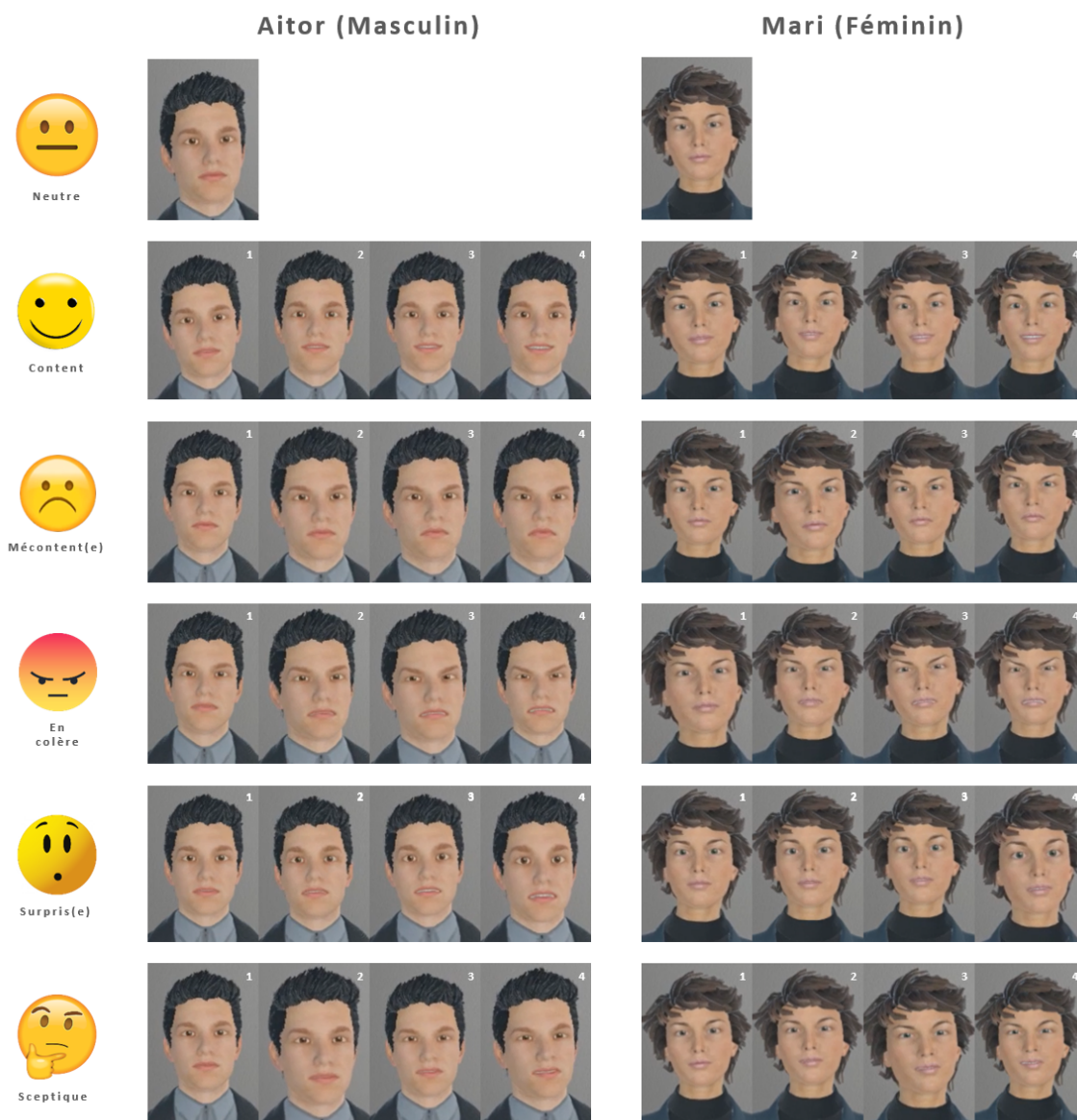


FIGURE 33.1: Expressions faciales émotionnelles dessinées avec Morph3D selon 4 niveaux d'intensité, pour deux personnages masculin (Aitor) et féminin (Mari)

TABLE 33.1: Blendshapes Morph3D et valeurs utilisés pour les expressions faciales émotionnelles

Expression	Blendshapes	Valeur			
		Niv. 1	Niv. 2	Niv. 3	Niv. 4
Content(e)	eCTRLHappy	25.00	50.00	75.00	100.00
	eCTRLExcitement	6.25	12.50	18.75	25.00
Mécontent(e)	eCTRLGlare	25.00	50.00	75.00	100.00
En colère	eCTRLAngry	25.00	50.00	75.00	100.00
Surpris(e)	eCTRLShock	25.00	50.00	75.00	100.00
	eCTRLMouthOpen_NEGATIVE_	18.75	37.5	56.25	75.00
Sceptique	eCTRLConfused	12.50	25.00	37.50	50.00
	eCTRLContempt	25.00	50.00	75.00	100.00

Comparaison des courbes SPC entre les personnages masculin et féminins (étude préliminaire avec Morph3D)

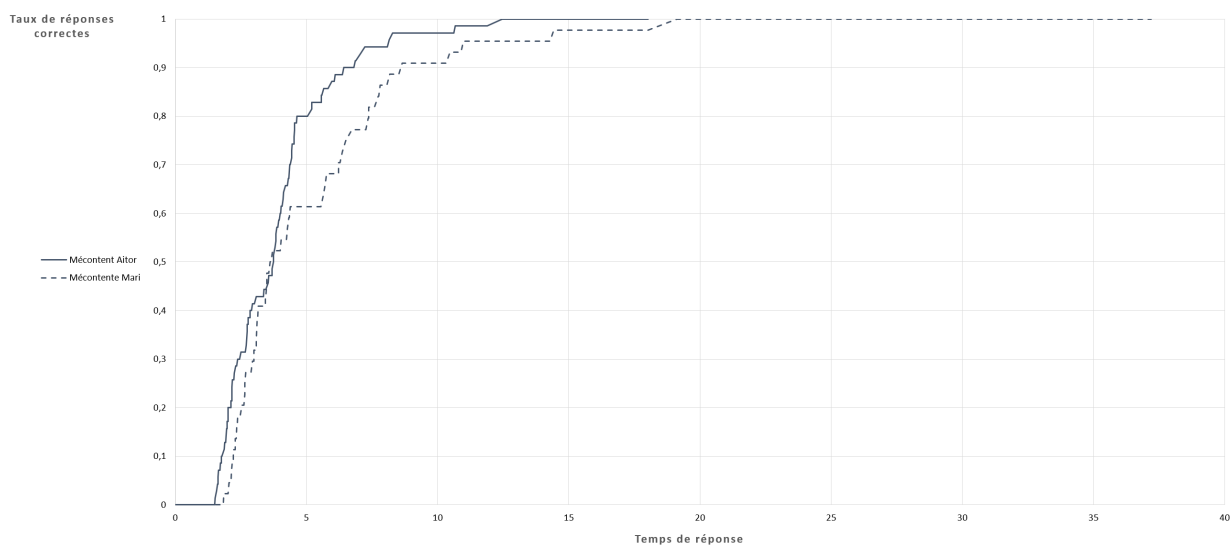
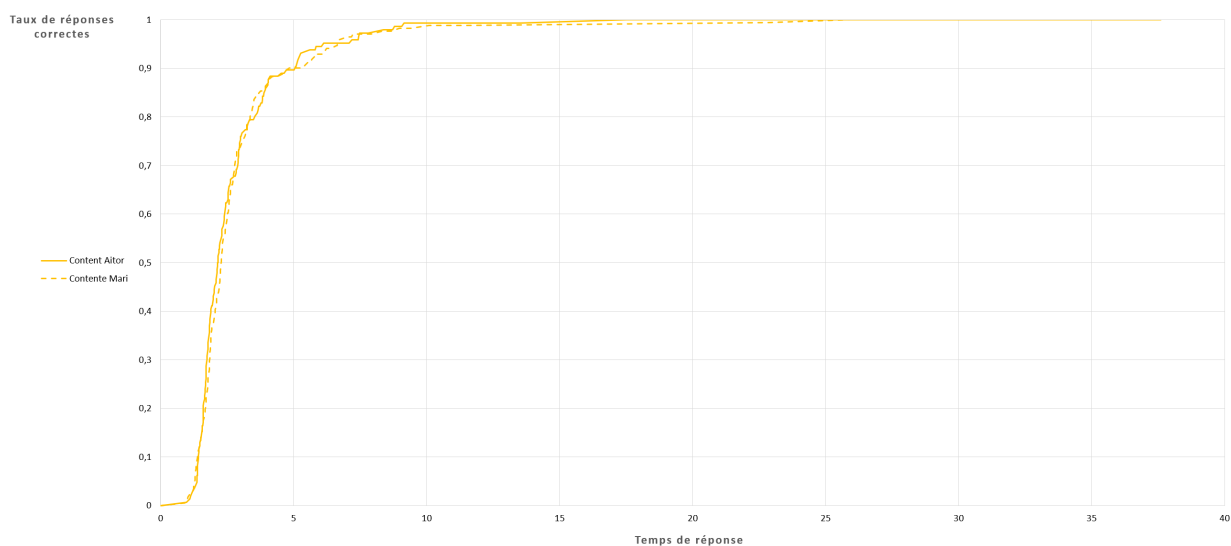
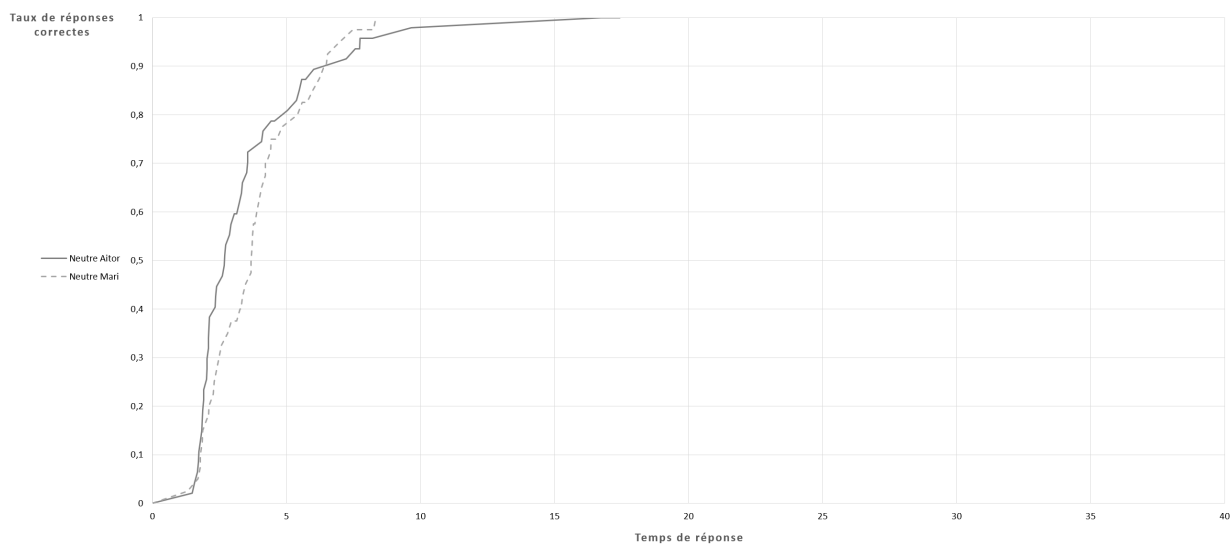


FIGURE 34.1: Courbes SPC des expressions *Neutre*, *Content(e)* et *Mécontent(e)* selon les personnages masculin (Aitor) et féminin (Mari)

ANNEXE 34. COMPARAISON DES COURBES SPC ENTRE LES PERSONNAGES MASCULIN ET FÉMININS (ÉTUDE PRÉLIMINAIRE AVEC MORPH3D)

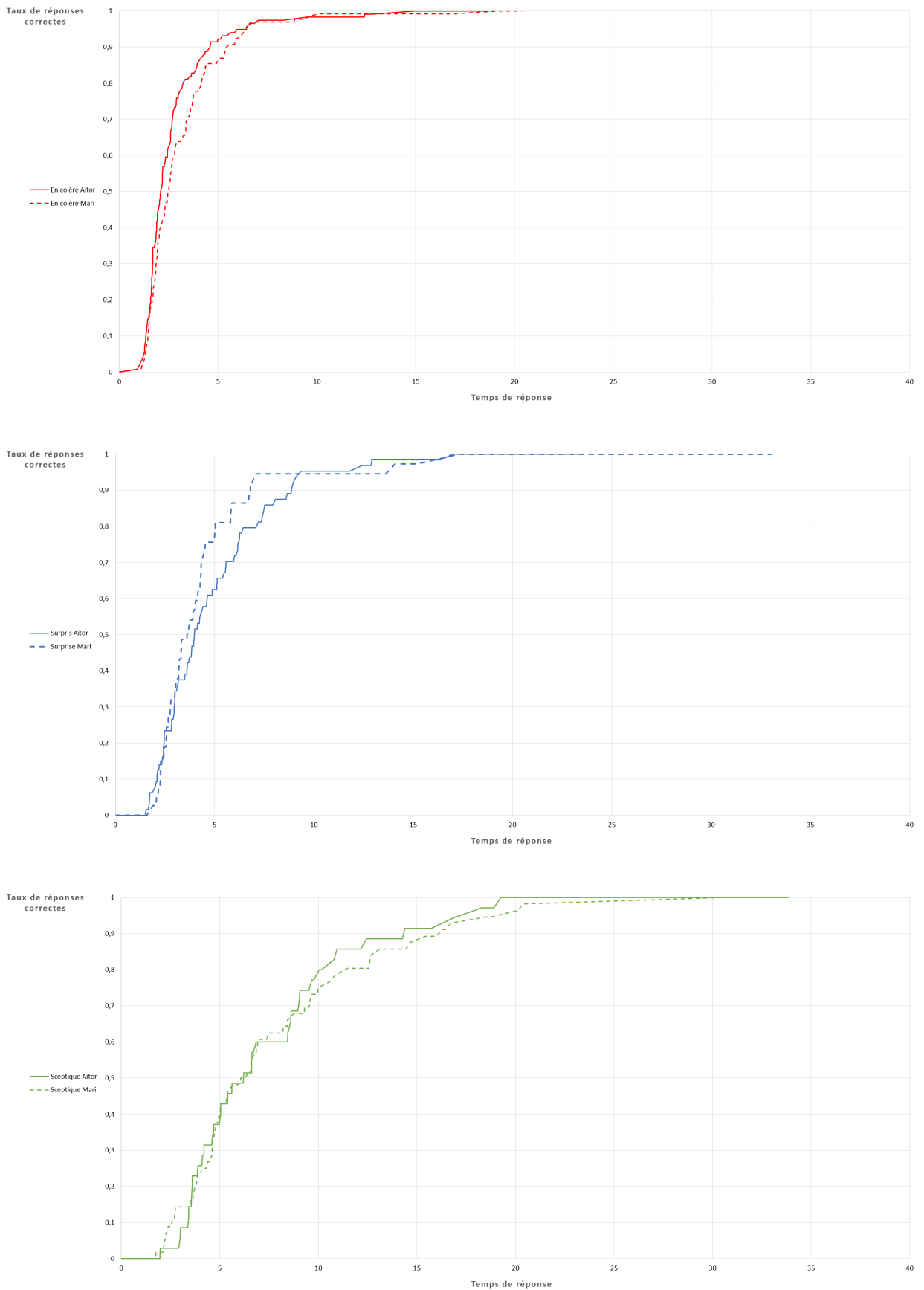


FIGURE 34.2: Courbes SPC des expressions *En colère*, *Surpris(e)* et *Sceptique* selon les personnages masculin (Aitor) et féminin (Mari)

35

**Étude des variations inter-sexes dans la perception
des expressions faciales émotionnelles**

I Objectifs

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 4¹, certains auteurs [171] ont souligné l'impact du sexe lors de l'interaction avec une machine. Or, avons également souligné que les expressions faciales émotionnelles constituaient une composante principale de l'interaction sociale.

Les sujets ayant évalué les expressions sur des personnages des deux sexes, nous avons donc voulu analyser si des variations existaient en fonction du sexe des personnages et de celui des sujets.

Nous avons ainsi souhaité étudier les résultats de l'étude préliminaire, en divisant notre population en deux échantillons regroupant les sujets en fonction de leur sexe.

Nous avons ensuite cherché à en vérifier les conclusions, sur les résultats des expérimentations visant à évaluer des expressions faciales émotionnelles en Réalité Virtuelle.

II Méthodologie

Nous émettons le postulat qu'une expression faciale émotionnelle est efficacement dessinée lorsqu'elle est correctement et spontanément perçue. Nous identifions donc deux critères permettant de qualifier nos expressions :

- la **correction** de la perception, i.e. lorsque l'émotion est perçue comme non-neutre et qu'elle n'est pas confondue avec une autre émotion.
- la **spontanéité** de la perception, i.e. lorsque la prise de décision est rapide, qu'elle ne laisse place qu'à peu d'hésitations.

Pour analyser si des variations peuvent être observées entre les personnages et le sexe des sujets, nous proposons donc d'appliquer la méthodologie suivante :

1. Analyser dans un premier temps la correction, via les taux d'erreur.

Nous observons les différences entre les taux d'erreur des sujets de sexe masculin et féminin, en fonction des personnages et sur les différents niveaux d'intensité de l'émotion étudiée. À partir de ces observations, nous retiendrons une ou plusieurs expressions pour lesquelles des effets inter-sexes semblent se dessiner.

2. Analyser ensuite la correction des expressions retenues, en étudiant la répartition des réponses.

Pour cela, nous procédons en deux temps.

Nous commençons par observer d'abord la répartition, afin d'en relever des différences potentielles.

Lorsque nous observons des différences, nous cherchons ensuite à établir si elles peuvent ou non être liées à un effet de hasard. Nous analyserons notamment si une émotion est faussement perçue de manière plus significative selon le sexe des sujets. Pour ce faire, nous formulons 4 hypothèses que nous souhaitons vérifier.

Soit une émotion diffusée E . Soit X une autre émotion correspondant à un des choix faux possibles, pour laquelle nous souhaitons voir si les sujets n'ont pas tendance à se tromper plus significativement en fonction de leur sexe.

Les hypothèses formulées sont les suivantes :

H1 - Les hommes et les femmes perçoivent significativement différemment E

H2 - Une des deux populations choisit E en proportions significativement différentes que l'autre population

H3 - Une des deux populations choisit E ou X en proportions significativement différentes que l'autre population

H4 - Une des deux populations choisit E et X en proportions significativement différentes que l'autre population

Ces hypothèses permettent donc de répondre à plusieurs questions (Figure 35.1).

L'hypothèse H1 évalue si les hommes et les femmes présentent une répartition des choix significativement différente sur les n émotions.

L'hypothèse H2 établit si une des deux populations se trompe plus souvent que l'autre.

Enfin, l'hypothèse H3 permet de vérifier qu'une des deux populations ne se trompe pas plus souvent pour autre chose que l'émotion X , afin de pouvoir analyser ensuite si une des deux populations perçoit X au lieu de E (hypothèse H4).

Afin de vérifier ces hypothèses, nous proposons d'utiliser différents outils statistiques :

- Pour H1, nous proposons d'utiliser différents tests statistiques, selon leur applicabilité (Figure 35.2).

S'il est applicable, nous proposons d'appliquer un test de χ^2 [145]².

Dans notre cas, pour une émotion diffusée à un niveau d'intensité donné, il va permettre d'établir si on peut rejeter l'hypothèse (pour $p \leq 0.05$) qu'il y a une indépendance entre les émotions perçues et le sexe des sujets.

1. Voir Chapitre 4, p.118

2. Voir Chapitre 2, p.62

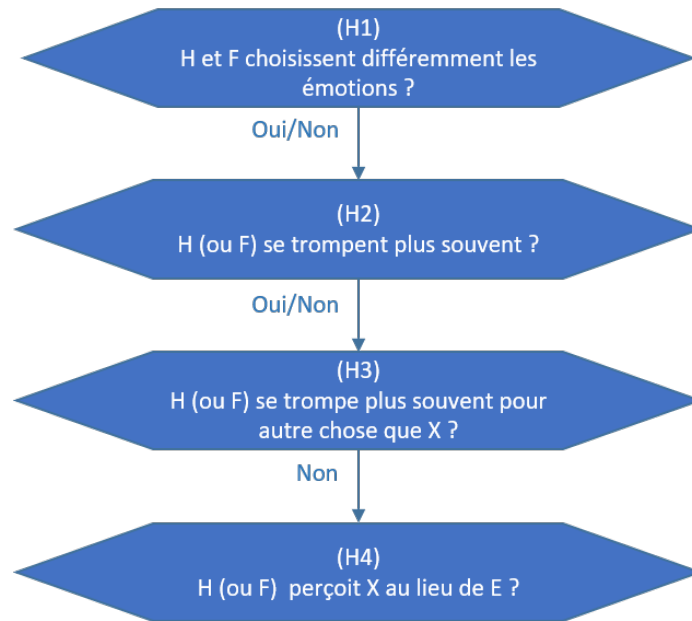


FIGURE 35.1: Méthodologie d'analyse des variations entre hommes (H) et femmes (F), hypothèses testées

Soit une émotion diffusée E.

Soit C un ensemble de choix et X un choix faux correspondant à une autre émotion.

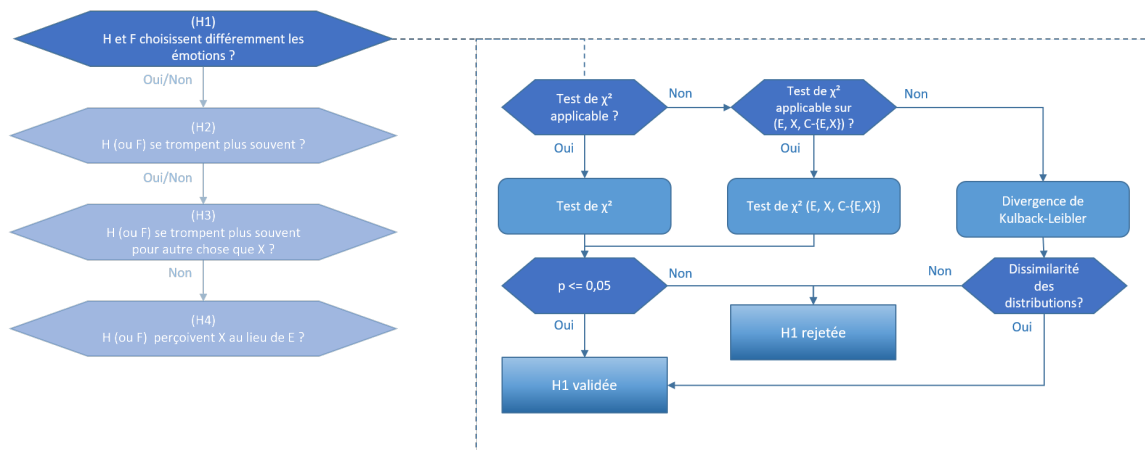


FIGURE 35.2: Méthodologie pour la vérification de l'hypothèse H1

Cependant, si nos données ne remplissent pas en l'état les conditions d'application du test³, nous proposons d'effectuer le test de χ^2 en regroupant les autres émotions que celles que nous souhaitons comparer (E et X), au sein d'une même classe (Figure 35.2).

Pour un émotion diffusée à un niveau d'intensité donné, le test sur ce tableau de contingence restreint permettra donc de déterminer si on peut rejeter l'hypothèse (pour $p \leq 0.05$) selon laquelle le sexe des sujets est indépendant de la répartition des choix de l'émotion perçue entre l'émotion diffusée, une émotion X et les autres émotions.

Si ce nouveau tableau de contingence ne remplit toujours pas ces conditions, nous proposons alors d'analyser les distributions, en appliquant à nouveau la méthode utilisant la divergence de Kullback-Leibler [221], employée au Chapitre 4.

Cette mesure permet de déterminer la dissimilarité entre deux distributions. Dans notre cas, pour une émotion diffusée à un niveau d'intensité donné, nous calculerons donc les divergences entre les distributions des sujets masculins (H) et féminins (F) : $D_{KL}(H||F)$ et $D_{KL}(F||H)$.

Comme au Chapitre 4, nous générerons des variations aléatoires des divergences de Kullback-Leibler (sur un échantillon de 10 000 variations⁴), afin d'établir de façon empirique un seuil (α), en dessous duquel la plus

3. Voir conditions d'applications du test mentionnées au Chapitre 2 (p.63)

4. Le code Matlab utilisé est accessible en Annexe 24 (p.287)

II. MÉTHODOLOGIE

Soit une émotion diffusée E.

Soit C un ensemble de choix et X un choix faux correspondant à une autre émotion.

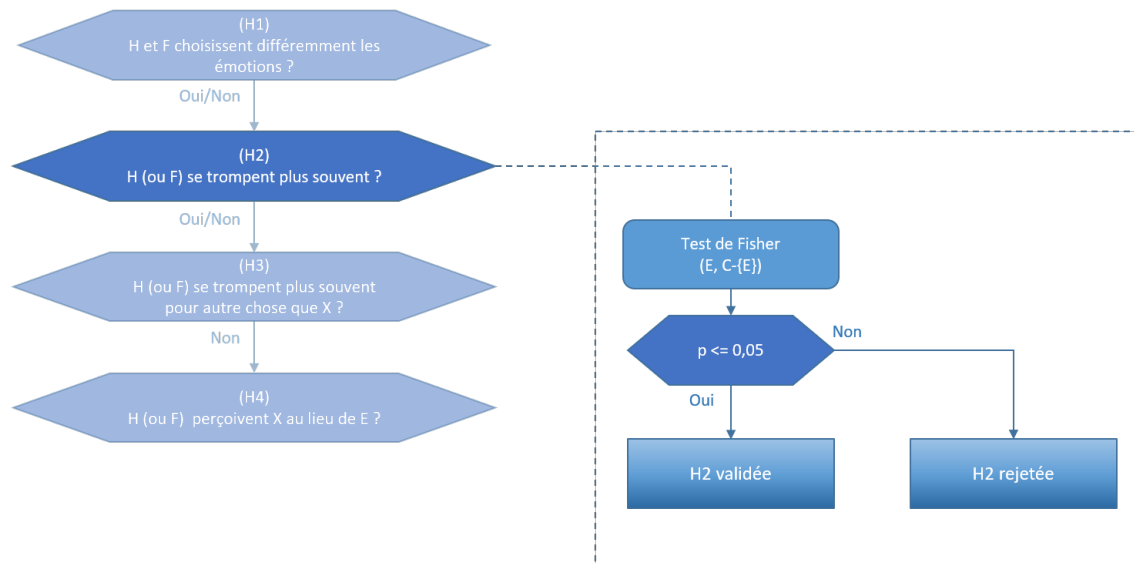


FIGURE 35.3: Méthodologie pour la vérification de l'hypothèse H2

petite des divergences ($\min(D_{KL}(H||F), D_{KL}(F||H))$) ne permet pas de différencier les deux distributions. Par conséquent, si la plus petite des divergences s'avère supérieure à ce seuil α , alors les distributions des choix des sujets masculins et féminins, sont suffisamment différentes pour être statistiquement significatives.

- Pour vérifier H2 et établir si les sujets se trompent plus souvent selon leur sexe, nous proposons de regrouper toutes les émotions autres que celle diffusée au sein d'une même catégorie. Nous obtenons ainsi un tableau de contingence 2×2 ayant pour catégories Hommes/Femmes et E/Autres.

Pour vérifier si les variables de ce tableau carré sont indépendantes, nous proposons d'utiliser le test exact de Fisher [148]⁵ (Figure 35.3).

Appliqué à ce tableau de contingence carré, ce test permet de rejeter l'hypothèse d'indépendance entre le sexe des sujets et le fait de choisir la bonne émotion (pour $p \leq 0.05$).

- Pour H3 et H4, nous proposons également d'utiliser le test exact de Fisher (Figure 35.4).

Comme nous l'avons vu précédemment, la finalité de l'hypothèse H4 consiste à déterminer si les sujets perçoivent de manière plus significative une autre émotion (X) que celle diffusée, selon le sexe des sujets. Nous souhaitons donc dans un premier temps vérifier que les sujets ne se trompent pas plus souvent pour autre chose que l'émotion X (hypothèse H3), afin d'exclure les cas où l'ambiguïté de perception ne provienne pas uniquement de cette émotion et de l'émotion diffusée (E).

Nous proposons donc de vérifier H3 en regroupant les effectifs notre tableau de contingence en deux catégories : une classe regroupant les choix des émotions E et X, une classe regroupant les choix des autres émotions. En appliquant un test exact de Fisher sur ce tableau de contingence, nous vérifierons si nous pouvons rejeter l'hypothèse d'indépendance entre le sexe des sujets et le fait de choisir autre chose que E ou X (pour $p \leq 0.05$). Si tel est le cas, nous sommes donc sur une situation où l'ambiguïté de perception ne provient pas uniquement de ces deux émotions.

Si ce n'est en revanche pas le cas, nous proposons d'effectuer un test exact de Fisher sur un tableau de contingence, pour lequel les catégories sont les choix des émotions E et X. Nous vérifierons ainsi si nous pouvons rejeter l'hypothèse d'indépendance entre le sexe des sujets et le fait de choisir X au lieu de E (pour $p \leq 0.05$). Dans ce cas-là, nous pourrions en conclure que les sujets ont tendance à percevoir, de manière significative, l'émotion fautive X au lieu de l'émotion diffusée E.

3. Analyser la spontanéité de la perception, en observant les temps de réponse.

Nous souhaitons comparer la spontanéité de la perception selon les personnages et le sexe des sujets, en cherchant à voir si des différences peuvent être observées sur les temps de réponse. Lorsqu'une différence est observée, nous chercherons à nouveau d'établir si ces différences sont significatives. Nous utiliserons donc également des tests statistiques, en suivant la méthodologie de tests sur échantillons indépendants présentée au Chapitre 2⁶.

4. Analyser la spontanéité des perceptions correctes.

5. Voir Chapitre 2, p.63

6. Voir Chapitre 2, paragraphe *Méthodologie pour la comparaison d'échantillons indépendants* (p.60)

Soit une émotion diffusée E.

Soit C un ensemble de choix et X un choix faux correspondant à une autre émotion.

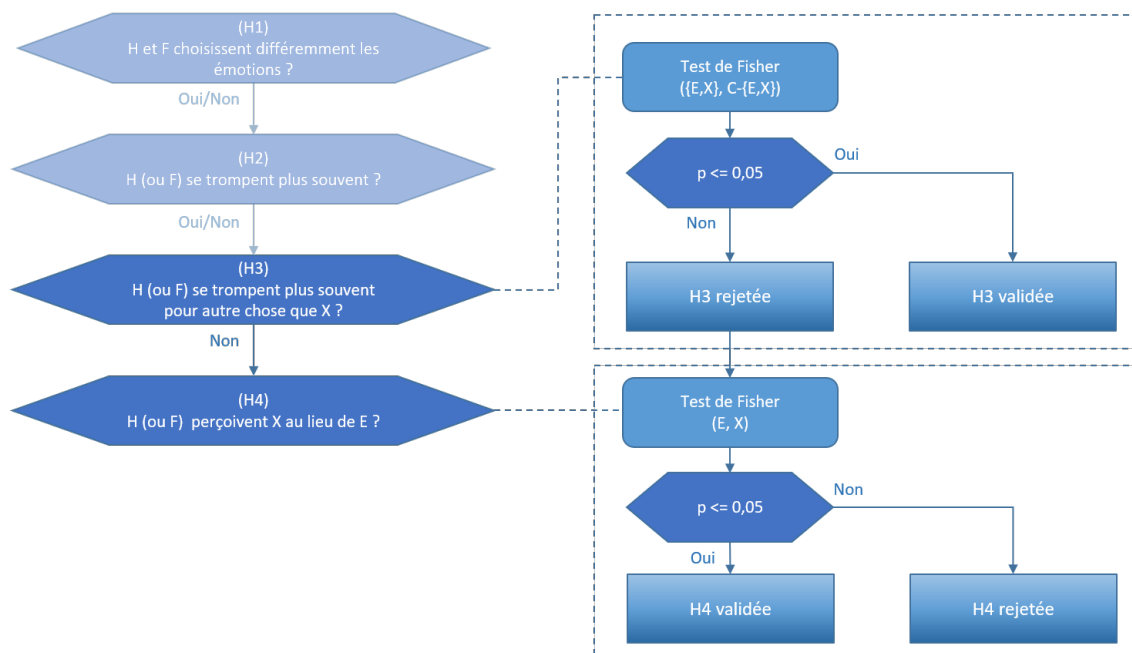


FIGURE 35.4: Méthodologie pour la vérification des hypothèses H3 et H4

Lors de l'étude préliminaire, nous avons établi une dépendance modérée entre la perception correcte d'une expression faciale émotionnelle et le fait de prendre peu de temps à répondre⁷.

Nous proposons donc d'analyser à nouveau la *Spontanéité des Perceptions Correctes*⁸, en dessinant les courbes SPC des sujets masculins et féminins, pour les expressions des personnages que nous souhaitons analyser.

Dans le paragraphe suivant, nous utiliserons donc cette méthodologie en analysant la correction et la spontanéité de la perception des expressions pour lesquelles les résultats des sujets semblent différer, en fonction de leur sexe et du personnage face auquel ils sont confrontés.

III Étude préliminaire

Lorsqu'on observe les taux d'erreur des sujets en fonction de leur sexe (Figure 35.5), nous discernons des différences potentielles pour trois des expressions sur lesquelles nous proposons de nous pencher dans les paragraphes suivants : *Content(e)*, *Mécontent(e)* et *En colère*.

Pour les expressions *Surpris(e)* et *Sceptique*, si certaines différences moins marquées peuvent être observées, les taux d'erreur restent bien trop importants sur les quatre niveaux d'intensité pour pouvoir les analyser.

Enfin, l'expression *Neutre* ne semble pas indiquer de différences de taux d'erreur en fonction du sexe des sujets.

Résultats de l'expression *Content(e)*

L'expression *Content(e)* indique des taux d'erreur plus importants pour les sujets féminins, face au niveau 2 d'intensité du personnage masculin (Aitor, Figure 35.5) et au niveau 1 du personnage féminin (Mari).

Lorsqu'on analyse la répartition des réponses, on observe que les sujets s'étant trompés ont perçu le niveau 2 d'Aitor comme *Neutre* (Figure 35.6). Il semble que ce soit le cas de manière plus accentuée chez les sujets féminins.

On observe le même effet en ce qui concerne le niveau 1 de Mari, avec là encore une accentuation du phénomène chez les sujets féminins.

Nous avons donc voulu analyser si ces différences de répartition vers le choix de l'émotion *Neutre* étaient statistiquement significatives. Les tests n'ont pas permis de montrer que ces différences étaient suffisamment importantes pour l'être.

Les temps de réponse des sujets des deux sexes semblent similaires sur chacun de ces niveaux (Figure 35.6).

7. Voir paragraphe *Résultats : Spontanéité de la perception* de l'étude préliminaire, Annexe 32 (p.332)

8. Voir paragraphe *Méthodologie* de l'étude préliminaire, Annexe 32 (p.330)

III. ÉTUDE PRÉLIMINAIRE

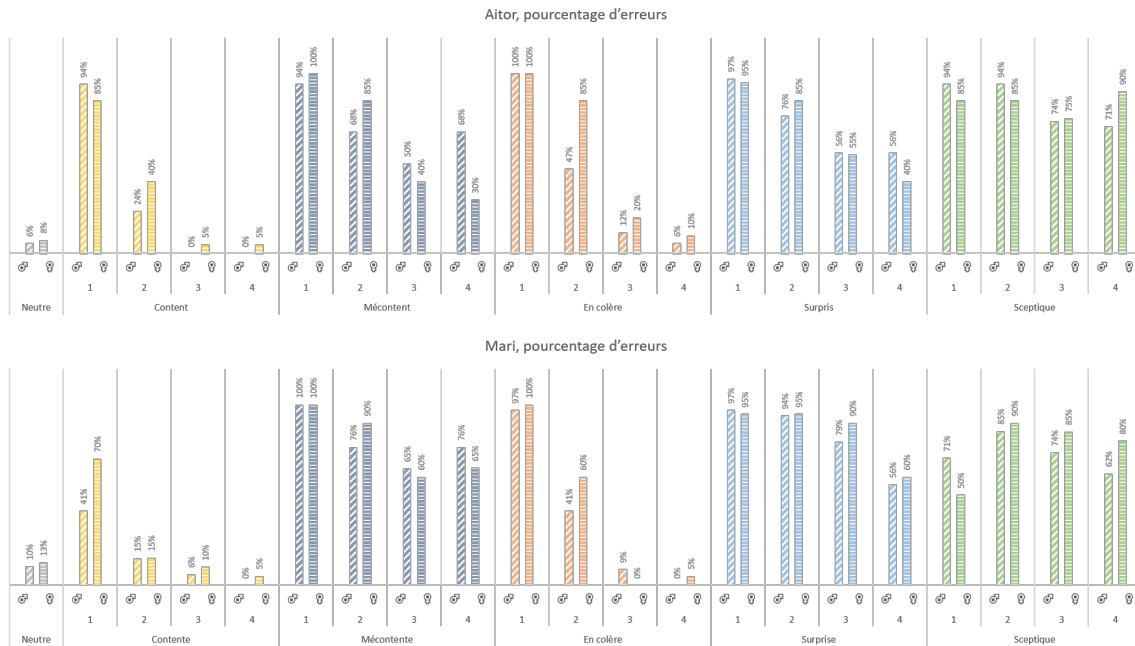


FIGURE 35.5: Pourcentage d'erreurs pour les personnages Aitor (masculin) et Mari (féminin), selon le sexe des sujets

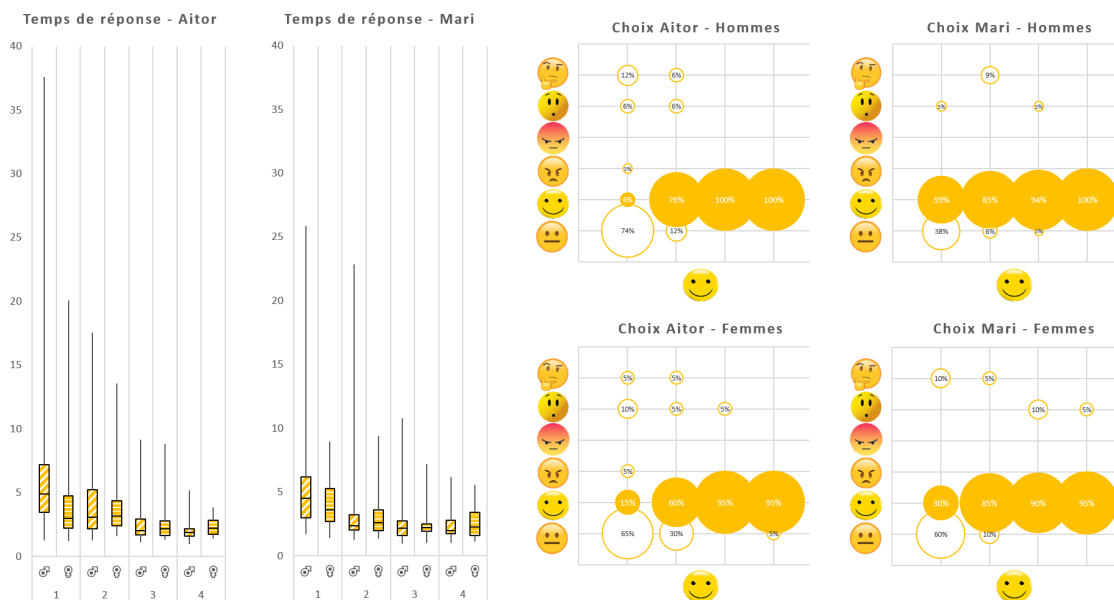


FIGURE 35.6: Temps de réponse et répartition face à l'expression *Content(e)* pour les personnages Aitor (masculin) et Mari (féminin), selon le sexe des sujets

ANNEXE 35. ÉTUDE DES VARIATIONS INTER-SEXES DANS LA PERCEPTION DES EXPRESSIONS FACIALES ÉMOTIONNELLES

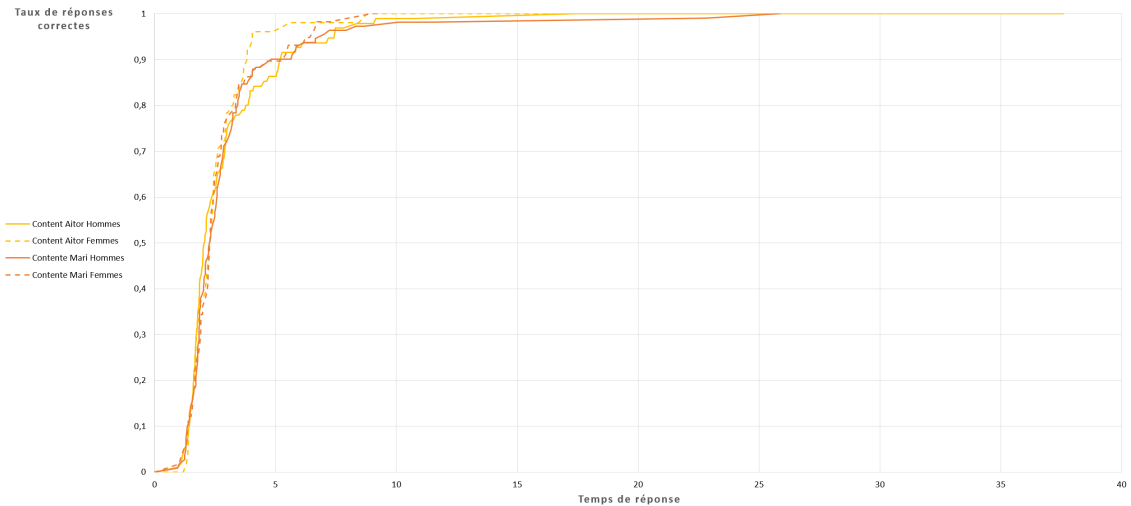


FIGURE 35.7: Courbes SPC pour l'expression *Content(e)*, selon le sexe des sujets et des personnages

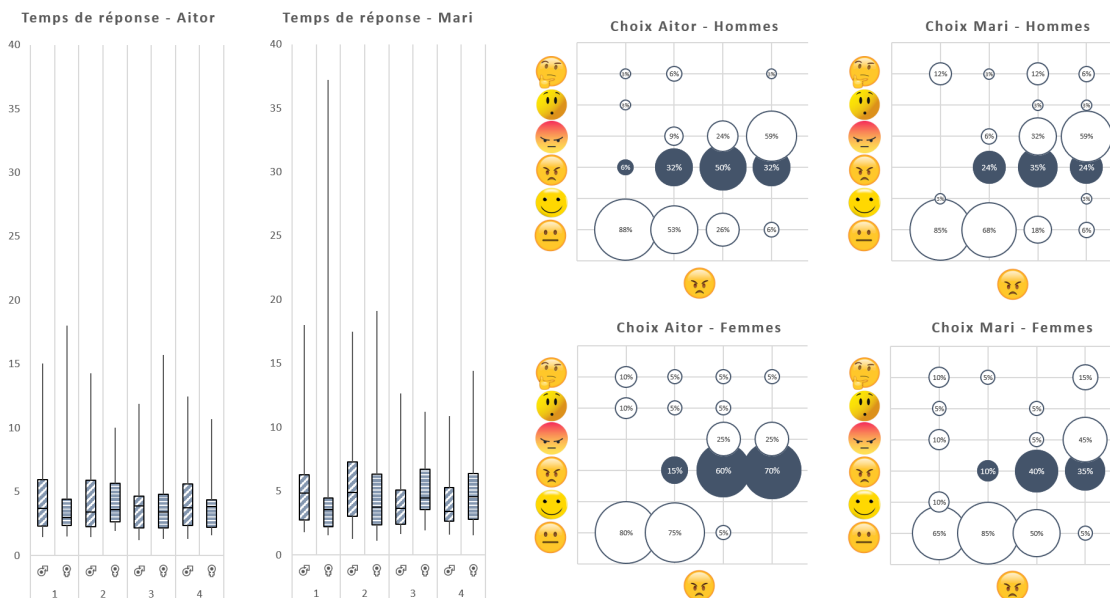


FIGURE 35.8: Temps de réponse et répartition face à l'expression *Mécontent(e)* pour les personnages Aitor (masculin) et Mari (féminin), selon le sexe des sujets

Les courbes SPC de l'expression *Content* d'Aitor indiquent cependant une spontanéité légèrement plus importante de la part des sujets féminins (Figure 35.7)⁹. Celles de Mari semblent en revanche montrer des perceptions similaires pour tous les sujets.

Lorsqu'on analyse la courbe SPC, on constate également que la spontanéité des sujets féminins semble évoluer légèrement plus rapidement face à Aitor que face à Mari.

Résultats de l'expression *Mécontent(e)*

Pour l'expression *Mécontent(e)* d'Aitor, le taux d'erreur semble plus élevé pour les sujets masculins sur les deux derniers niveaux d'intensité (Figure 35.5). En revanche, pour les deux personnages, les sujets féminins semblent s'être plus souvent trompé sur le deuxième niveau d'intensité.

Là encore, nous observons les mêmes effets sur les taux d'erreur face à Mari, mais de manière cependant moins marquée.

9. Toutes les courbes SPC comparant la spontanéité des perceptions correctes des sujets en fonction de leur sexe et des personnages sont accessibles en Annexe 36

TABLE 35.1: Résultats des tests statistiques sur les répartitions des choix de l'expression *Mécontent(e)*, pour lesquels des différences sont observables selon le sexe des sujets

Personnage	Niveau	H1	H2	H3	H4
Aitor	3	Rejetée : Tests de χ^2 non applicables, ($D_{KL_{min}} = 0.1453$) < ($\alpha = 0.6972$)	Rejetée : $p > 0.05$	Rejetée : $p > 0.05$	Rejetée : $p > 0.05$
	4	Rejetée : Tests de χ^2 non applicables, ($D_{KL_{min}} = 0.1530$) < ($\alpha = 0.7412$)	Validée : $p = 0.0110$	Rejetée : $p > 0.05$	Validée : $p = 0.0186$
Mari	3	Rejetée : Tests de χ^2 non applicables, ($D_{KL_{min}} = 0.2186$) < ($\alpha = 0.6972$)	Rejetée : $p > 0.05$	Rejetée : $p > 0.05$	Validée : $p = 0.0149$
	4	Rejetée : Test de χ^2 applicable si regroupement, $p > 0.05$	Rejetée : $p > 0.05$	Rejetée : $p > 0.05$	Rejetée : $p > 0.05$

Si l'on se penche sur la répartition des réponses de l'émotion *Mécontent(e)*, on observe que les sujets masculins se sont plus souvent trompé en sélectionnant l'expression *En colère* sur les deux derniers niveaux d'intensité d'Aitor (Figure 35.8). Les sujets féminins, même s'ils se trompent moins, semblent également le faire pour l'expression *En colère*.

Face à Mari, nous observons le même effet pour les sujets masculins. Cependant, pour le niveau 3 d'intensité, les sujets féminins semblent au contraire plus souvent se tromper pour l'expression *Neutre*.

Pour Aitor, nous avons donc voulu analyser si ces différences de répartition vers le choix de l'émotion *En colère* étaient statistiquement significatives pour les deux derniers niveaux d'intensité de l'expression *Mécontent(e)*.

Pour Mari, nous avons en revanche cherché à le faire pour les différences de répartition vers le choix de l'émotion *Neutre*, au dernier niveau d'intensité.

Pour le niveau 3 de Mari, nous sommes par contre confronté à un effet particulier. Les réponses fausses semblent varier vers l'émotion *En colère* ou *Neutre* selon le sexe des sujets. Pour vérifier si cet effet entre trois émotions est significatif, nous proposons donc d'adapter notre méthodologie de la manière suivante (Figure 35.9) :

- Vérifier H1 en tenant compte de la troisième émotion (Y).
- Vérifier si les sujets se trompent plus souvent pour autre chose que X ou Y selon leur sexe (H3), en intégrant Y dans la même classe que E et X pour le test exact de Fisher.
- Vérifier si les sujets perçoivent E, X et Y différemment selon leur sexe (H4), en utilisant un test de χ^2 sur ces trois émotions s'il est applicable.

Les tests statistiques ont ainsi permis de confirmer que certaines des différences observées étaient significatives (Table 35.1).

Pour le dernier niveau d'intensité d'Aitor, les sujets masculins se sont significativement plus trompés (H2). Ils ont en effet significativement plus perçu l'émotion *En colère* face à l'expression *Mécontent(e)*.

En ce qui concerne le niveau 3 de Mari, une différence s'est également avérée significative. Les sujets masculins se sont significativement plus trompés pour l'émotion *En colère*, quand les sujets féminins se sont significativement plus trompés en percevant l'émotion *Neutre* (H4).

Les temps de réponse semblent supérieurs pour les sujets féminins, pour les deux derniers niveaux d'intensité (Figure 35.8). Cependant, ces différences ne s'avèrent pas statistiquement significatives (tests de normalité échoués ($p < 0.05$), Wilcoxon-Mann-Whitney : $p > 0.05$).

Les courbes SPC montrent que la *Spontanéité des Perceptions Correctes* semble meilleure chez les sujets masculins face à Mari (Figure 35.10). Face à Aitor, les spontanéités paraissent en revanche relativement similaires.

Résultats de l'expression *En colère*

L'expression *En colère* montre des taux d'erreur plus importants pour les sujets féminins face à Aitor, sur les trois derniers niveaux d'intensité (Figure 35.5). Cet effet tend à s'observer également sur Mari.

En analysant la répartition des réponses de l'expression *En colère*, on observe une différence importante sur le niveau 2 d'intensité, en fonction du sexe des sujets (Figure 35.11). Pour les deux personnages, les sujets féminins sélectionnent majoritairement l'expression *Mécontent(e)*. Même si les réponses fausses des sujets masculins se dirigent également vers cette expression, elles restent cependant moins importantes que les réponses correctes.

Les tests statistiques ont permis d'établir ces différences comme significatives (Table 35.2).

Pour Aitor, les sujets ont perçu les expressions significativement différemment selon leur sexe (H1). Les sujets féminins se sont significativement plus trompés que les sujets masculins (H2). En revanche, la répartition des réponses ne permet pas d'établir que l'ambiguïté provienne de l'émotion *Mécontent*, car les sujets féminins se trompent significativement plus souvent pour autre chose que cette émotion (H3 validée). Lorsqu'on analyse à nouveau la répartition des réponses, on constate qu'une proportion importante de sujets féminins s'est également trompée pour l'émotion *Neutre* (Figure 35.11).

ANNEXE 35. ÉTUDE DES VARIATIONS INTER-SEXES DANS LA PERCEPTION DES EXPRESSIONS FACIALES ÉMOTIONNELLES

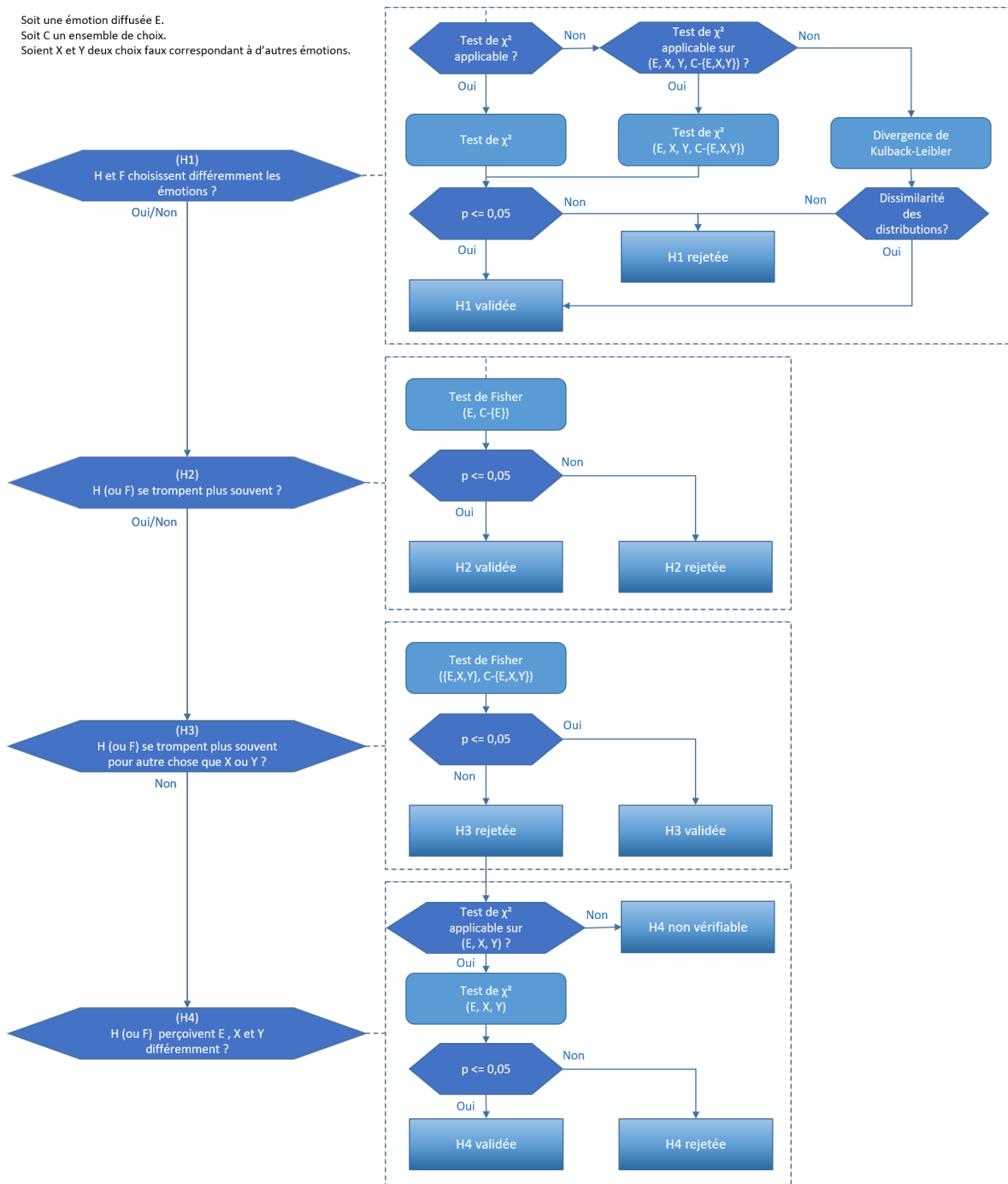


FIGURE 35.9: Méthodologie pour la vérification d’une répartition des choix différent vers deux émotions fausses, selon le sexe des sujets

TABLE 35.2: Résultats des tests statistiques sur les répartitions des choix de l’expression *En colère*, pour lesquels des différences sont observables selon le sexe des sujets

Personnage	Niveau	H1	H2	H3	H4
Aitor	2	Validée : Test de χ^2 applicable si regroupement, $p < 0.01$	Validée : $p > 0.0087$	Validée : $p = 0.0281$	
Mari	2	Rejetée : Tests de χ^2 non applicables, ($D_{KLmin} = 0.0954$) < ($\alpha = 0.6226$)	Rejetée : $p > 0.05$	Rejetée : $p > 0.05$	Validée : $p = 0.0448$

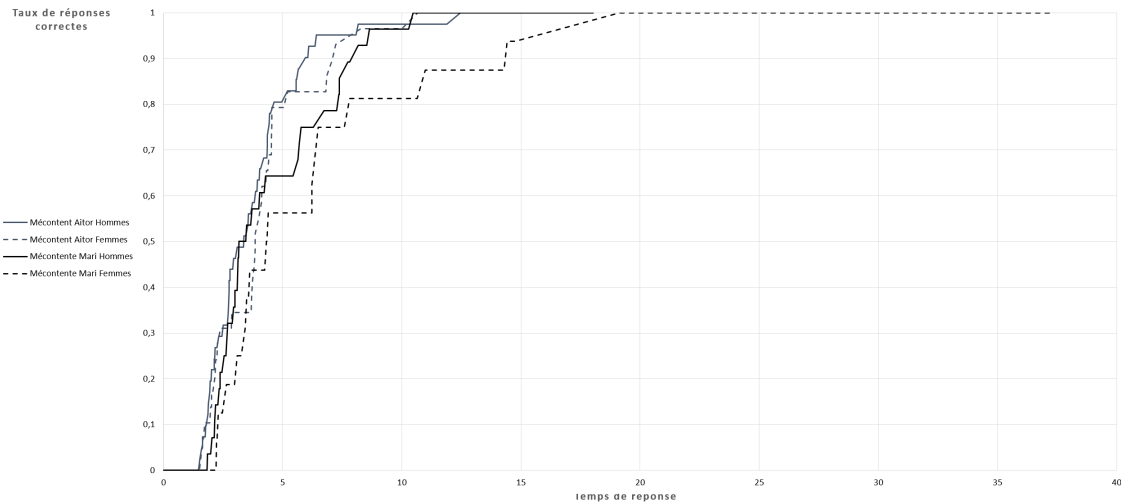


FIGURE 35.10: Courbes SPC pour l'expression *Mécontent(e)*, selon le sexe des sujets et des personnages

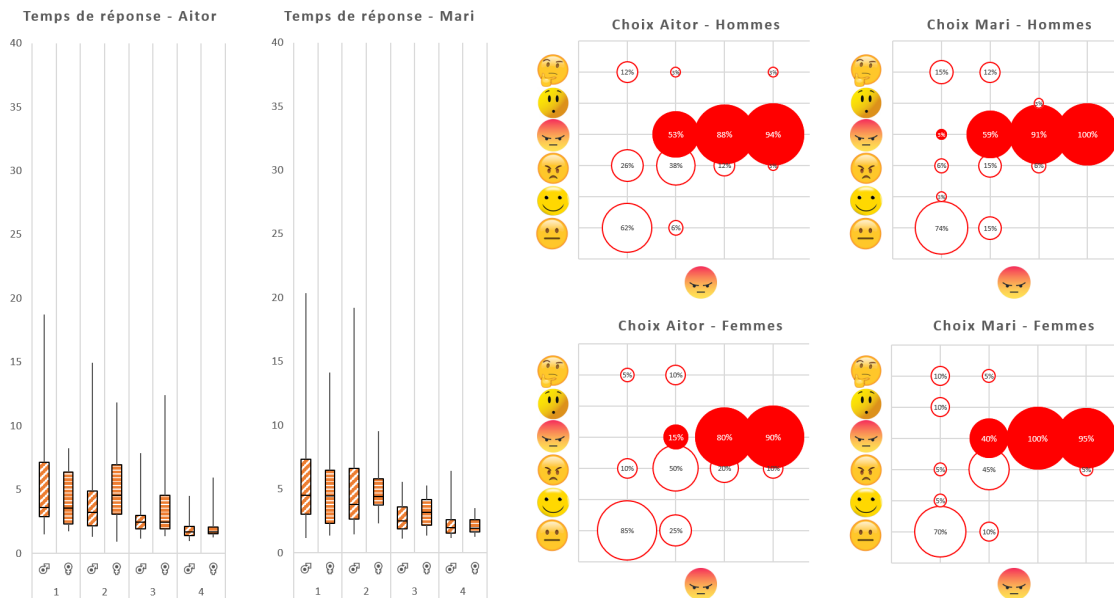


FIGURE 35.11: Temps de réponse et répartition face à l'expression *En colère* pour les personnages Aitor (masculin) et Mari (féminin), selon le sexe des sujets

En ce qui concerne Mari, les tests statistiques ont montré que les sujets féminins ont significativement plus perçu l'émotion *Mécontent* face à l'expression *En colère* (H4).

Pour les deux personnages, les temps de réponse des sujets féminins semblent supérieurs à ceux des sujets masculins sur ces trois niveaux (Figure 35.11). Néanmoins, ces différences ne se sont pas avérées statistiquement significatives (tests de normalité échoués ($p < 0.05$), Wilcoxon-Mann-Whitney : $p > 0.05$).

Face à Aitor, les courbes SPC semblent indiquer une *Spontanéité des Perceptions Correctes* légèrement meilleure pour les sujets masculins. Pour Mari, les courbes paraissent en revanche relativement similaires.

Discussions

L'analyse des taux d'erreur en fonction du sexe des sujets nous a amené à nous pencher les expressions *Content(e)*, *Mécontent(e)* et *En colère*.

Pour l'expression *Content(e)*, nous avons observé un taux d'erreur plus importants des sujets féminins sur le niveau 2 du personnage masculin et le premier niveau du personnage féminin. Ces erreurs semblent indiquer une perception de

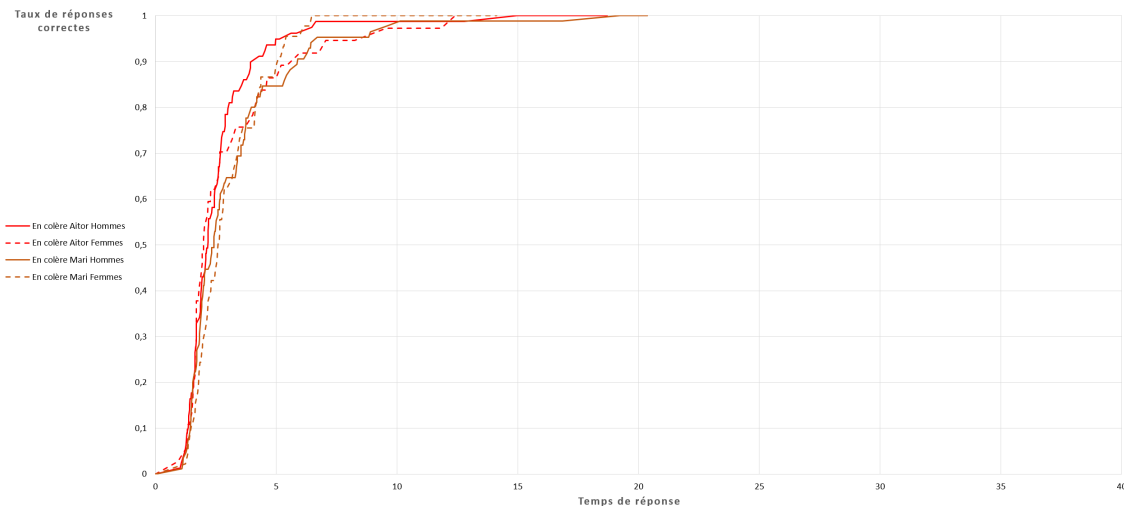


FIGURE 35.12: Courbes SPC pour l'expression *En colère*, selon le sexe des sujets et des personnages

l'émotion plus *Neutre*, mais nous n'avons pas pu l'établir de manière significative.

Sur ces niveaux, les temps de réponse semblent similaire sur ces niveaux, mais la *Spontanéité des Réponses Correctes* semble légèrement plus importante pour les sujets féminins face au personnage masculin.

Les sujets féminins semblent donc se tromper plus souvent pour *Neutre*, mais face au personnage masculin ils apparaissent légèrement plus spontanés lorsqu'ils perçoivent correctement l'émotion.

Ces résultats permettent ainsi seulement de suggérer que le début de la perception correcte de l'expression *Content(e)* pourrait être différent selon le sexe des sujets.

Nous avons aussi relevé une ambiguïté potentielle dans la perception des expressions *Mécontent(e)* et *En colère*.

Pour les deux derniers niveaux d'intensité de celles-ci, nous avons en effet observé des variations entre elles, en fonction des personnages et du sexe des sujets. Plusieurs de ces observations se sont avérées significatives :

- Pour le dernier niveau d'intensité de l'expression *Mécontent(e)* du personnage masculin, les sujets masculins se sont plus trompés que les sujets féminins et ont significativement plus perçu l'émotion *En colère*. Ces résultats permettent de relever une ambiguïté potentielle amenant les sujets masculins à percevoir de la colère face à l'expression *Mécontent(e)*.

- Au niveau 3 d'intensité de l'expression *Mécontent(e)* du personnage féminin, les sujets masculins se sont significativement plus trompés pour l'émotion *En colère*, alors que les sujets féminins se sont significativement plus trompés pour l'émotion *Neutre*.

Ces résultats permettent d'identifier deux phénomènes potentiels liés au sexe des sujets.

Pour les sujets masculins, ils viennent appuyer une nouvelle fois l'hypothèse d'une ambiguïté de perception de la colère face à l'expression *Mécontent(e)*. Comme il s'agit ce coup-ci du personnage féminin, ils permettent aussi de supposer que cet effet se manifesterait indépendamment du sexe du personnage virtuel.

En ce qui concerne les sujets féminins, ces résultats viennent corroborer l'hypothèse de variations inter-sexes dans le début de la perception de certaines expressions faciales émotionnelles, en incluant l'expression *Mécontent(e)*.

- Pour le niveau 2 de l'expression *En Colère* du personnage masculin, les sujets féminins se sont significativement plus trompés que les sujets masculins. Cependant, nous n'avons pas pu établir de manière significative que l'ambiguïté provenait de l'émotion *Mécontent(e)*. Nous observons seulement qu'une proportion importante des erreurs se partagent entre les émotions *Neutre* et *Mécontent(e)*.

Ces résultats viennent à nouveau supposer que le début de la perception d'une expression puisse varier selon le sexe des sujets face à certaines expressions faciales émotionnelles, y compris pour l'expression *En colère*.

Ils viennent aussi soulever une hypothèse inverse à celle établie pour l'ambiguïté de la perception des sujets masculins face à l'expression *Mécontent(e)*. Pour l'expression *En colère*, il semblerait en effet que l'expression soit ambiguë chez les sujets féminins, en percevant du mécontentement.

- Au niveau 2 de l'expression *En colère* du personnage féminin, les sujets féminins ont significativement plus perçu l'émotion *Mécontent(e)* que les hommes.

Ce résultat vient ainsi appuyer l'hypothèse que nous venons de formuler. Il pourrait y avoir une ambiguïté amenant les sujets féminins à percevoir du mécontentement face à l'expression *En colère*.

Pour les derniers niveaux de ces deux émotions, les sujets féminins semblent avoir pris plus de temps que leurs homologues masculins, mais cette différence ne s'est pas avérée statistiquement significative lors des tests statistiques.

L'expression *Mécontent(e)* a montré une moins bonne *Spontanéité des Réponses Correctes* des sujets féminins face au personnage féminin. Sur le personnage masculin, les résultats ont semblé similaires pour les sujets des deux sexes. Selon nous, cet effet vient appuyer l'hypothèse précédemment énoncée et selon laquelle le début de la perception des sujets féminins face au personnage féminin serait différent de celui des sujets masculins.

Pour l'expression *En colère*, l'inverse a semblé se dessiner. La *Spontanéité des Réponses Correctes* des sujets s'est montrée similaire pour le personnage féminin. En revanche, celle des sujets féminins face au personnage masculin ont semblé moins bonnes. Là encore, cet effet tend à corroborer l'hypothèse d'une ambiguïté de la perception des sujets féminins

face à l'expression *En colère* du personnage masculin.

Tous ces effets soulèvent une interrogation. Sont-ils liés aux lacunes précédemment identifiées concernant le dessin des expressions? Ou bien assistons nous à des effets de variations en fonction du sexe des sujets?

Pour répondre à ces questions, des travaux supplémentaires sont donc nécessaires afin de vérifier si :

- le début de la perception du contentement diffère en fonction du sexe,
- les sujets masculins ont tendance à percevoir de la colère plutôt que du mécontentement,
- les sujets féminins ont à l'inverse tendance à percevoir du mécontentement plutôt que de la colère.

Si ces hypothèses venaient à se confirmer, alors la question de faire varier la manière de dessiner les expressions faciales émotionnelles en fonction des proportions d'hommes et femmes de la population cible d'apprenants pourrait se poser, afin de garantir la pertinence de l'outil d'apprentissage.

Néanmoins, certaines limites sont en prendre en compte afin de nuancer nos résultats.

Comme nous venons de le rappeler, nous avons vu que la manière de dessiner les expressions faciales émotionnelles et de fixer les niveaux d'intensité n'était pas adéquate¹⁰. Il est donc fortement possible que ces lacunes aient influé sur les résultats de notre étude des variations inter-sexe.

Là encore, améliorer les expressions et produire de nouvelles expérimentations pourrait permettre de confirmer ou d'infirmer cet impact.

Lors de l'étude préliminaire, nous avons également identifié que l'utilisation des émoticônes pour définir l'émotion perçue pouvait avoir influencé les résultats. Bien que les sujets aient été brièvement sensibilisés à leur signification, rien ne garantit que les ambiguïtés que nous venons de relever concernant la perception des expressions, ne soient pas en réalité liées à des ambiguïtés de perception des émoticônes.

Reproduire l'expérimentation en utilisant des labels définissant l'émotion perçue pourrait permettre de lever cette incertitude.

Comme nous l'avons mentionné, les expressions faciales émotionnelles ont été dessinées à partir de la perception des développeurs et des blendshapes de l'outil Morph 3D. Or, les développeurs étaient tous de sexe masculin, ce qui peut expliquer que certaines différences aient tendance à se manifester pour les sujets féminins, comme par exemple un début de perception de l'émotion plus tardif.

Ainsi, la définition des expressions faciales émotionnelles et de leurs niveaux d'intensité en se basant sur la perception d'une population représentative de sujets, pourrait limiter ce biais potentiel.

Enfin, la dernière limite que nous identifions concerne la méthodologie statistique que nous avons proposé pour vérifier que la répartition des choix différait en fonction du sexe des sujets.

Pour cela, l'hypothèse H1 consistait à analyser si les sujets choisissaient significativement différemment les émotions perçues en fonction de leur sexe.

Afin de la vérifier, nous avons proposé d'utiliser un test de χ^2 , après avoir vérifié qu'il était applicable. Lorsque ce n'était pas le cas, nous avons proposé d'analyser les distances de Kullback-Leibler de chaque population.

Une limite de cette méthodologie provient de l'utilisation de ces deux tests, qui n'analysent pas foncièrement la même chose. Si χ^2 analyse les probabilités croisées de chaque classe afin de déterminer si les variables sont dépendantes, la comparaison des distances de Kullback-Leibler teste en revanche les distributions des choix des sujets masculins et féminins.

Cependant, nous n'avons pas trouvé d'autres méthodes n'aboutissant pas à rendre l'hypothèse H1 invérifiable dans certains cas d'inapplicabilité du test de χ^2 .

Conclusions

Dans cette section, nous avons appliqué la méthodologie afin d'établir si des différences étaient significatives pour la répartition des choix des sujets, en fonction de leur sexe.

Nos résultats ont permis d'observer des variations significatives selon le sexe des sujets. Celles-ci nous amènent soulever plusieurs hypothèses que nous chercherons à vérifier dans la section suivante.

Il sera notamment question de chercher à analyser si le début de la perception des expressions *Content(e)*, *Mécontent(e)* et *En colère* diffère en fonction du sexe des sujets.

Nous chercherons également à vérifier si les sujets masculins ont tendance à percevoir de la colère face à du mécontentement, et si on observe le phénomène inverse pour les sujets féminins face à de la colère.

Il est cependant nécessaire de s'affranchir au préalable de certains biais potentiels. Outre ceux que nous avons déjà identifié lors de l'étude préliminaire, il est également important de chercher à définir les expressions faciales émotionnelles et leurs niveaux d'intensité de manière plus pertinente, avant de produire de nouvelles expérimentations.

Dans la section suivante, nous chercherons donc à analyser les effets inter-sexes sur les résultats de l'évaluation des expressions dessinées à partir de la perception d'une population. Nous chercherons ainsi à vérifier les hypothèses formulées sur des expressions plus pertinentes.

10. Voir paragraphe *Discussions* du Chapitre 5 (p.333)

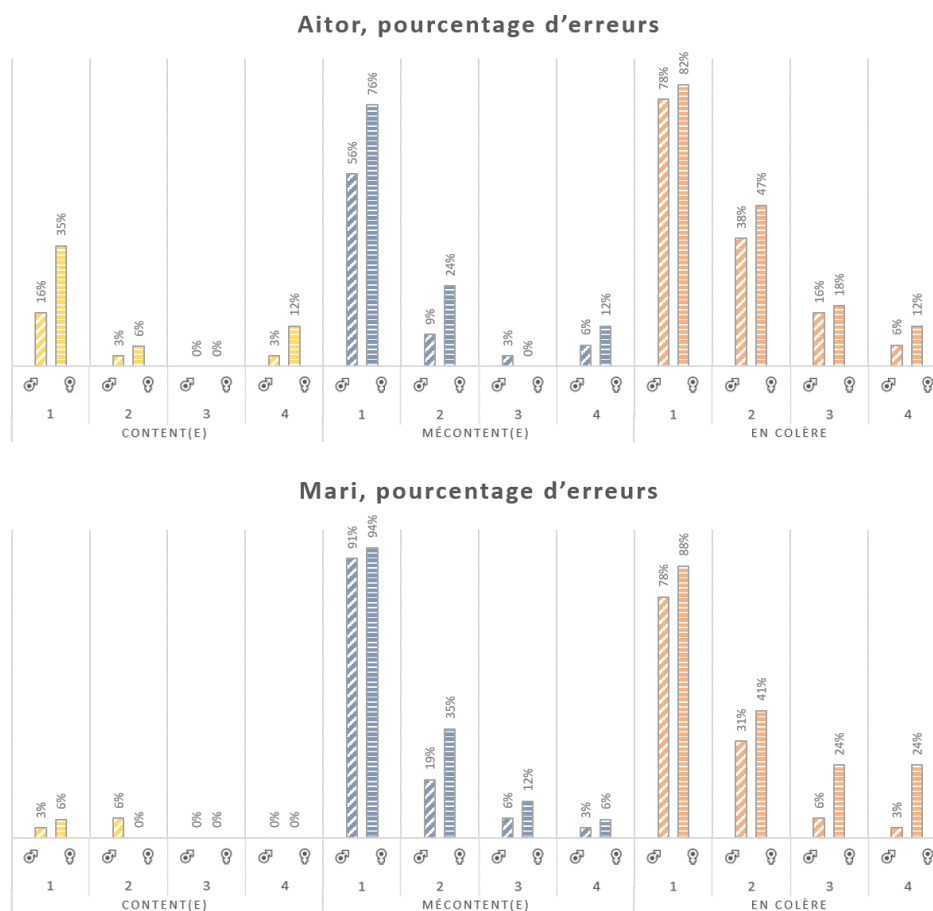


FIGURE 35.13: Pourcentage d'erreurs pour les personnages Aitor (masculin) et Mari (féminin), selon le sexe des sujets

IV Étude sur les expressions évaluées

Objectifs

Nous avons donc souhaité vérifier les hypothèses formulées lors de l'étude préliminaire :

- le début de la perception des expressions *Content(e)*, *Mécontent(e)* et *En colère* diffère en fonction du sexe
- les sujets masculins ont tendance à percevoir de la colère plutôt que du mécontentement
- les sujets féminins ont à l'inverse tendance à percevoir du mécontentement plutôt que de la colère

Pour vérifier si ces hypothèses se confirment, nous avons appliqué la méthodologie concernant l'analyse de la correction des expressions¹¹, sur les résultats des évaluations des dessins retenus pour les expressions *Content(e)*, *Mécontent(e)* et *En colère*.

Résultats de l'expression *Content(e)*

Au premier niveau d'intensité du personnage masculin (Aitor), l'expression *Content(e)* montre des taux d'erreur plus importants pour les sujets féminins (Figure 35.13).

Lorsqu'on analyse la répartition des réponses, on observe que les sujets féminins semblent s'être légèrement plus trompés pour l'expression *Neutre* (Figure 35.14).

Les tests statistiques n'ont cependant pas permis de montrer ces différences comme significatives.

Résultats de l'expression *Mécontent(e)*

Pour l'expression *Mécontent(e)*, le taux d'erreur semble plus élevé pour les sujets féminins, sur les deux premiers niveaux d'intensité du personnage masculin (Aitor) et sur le deuxième niveau d'intensité du personnage féminin (Mari, Figure

11. Voir étapes 1 et 2 de la méthodologie (p.344)

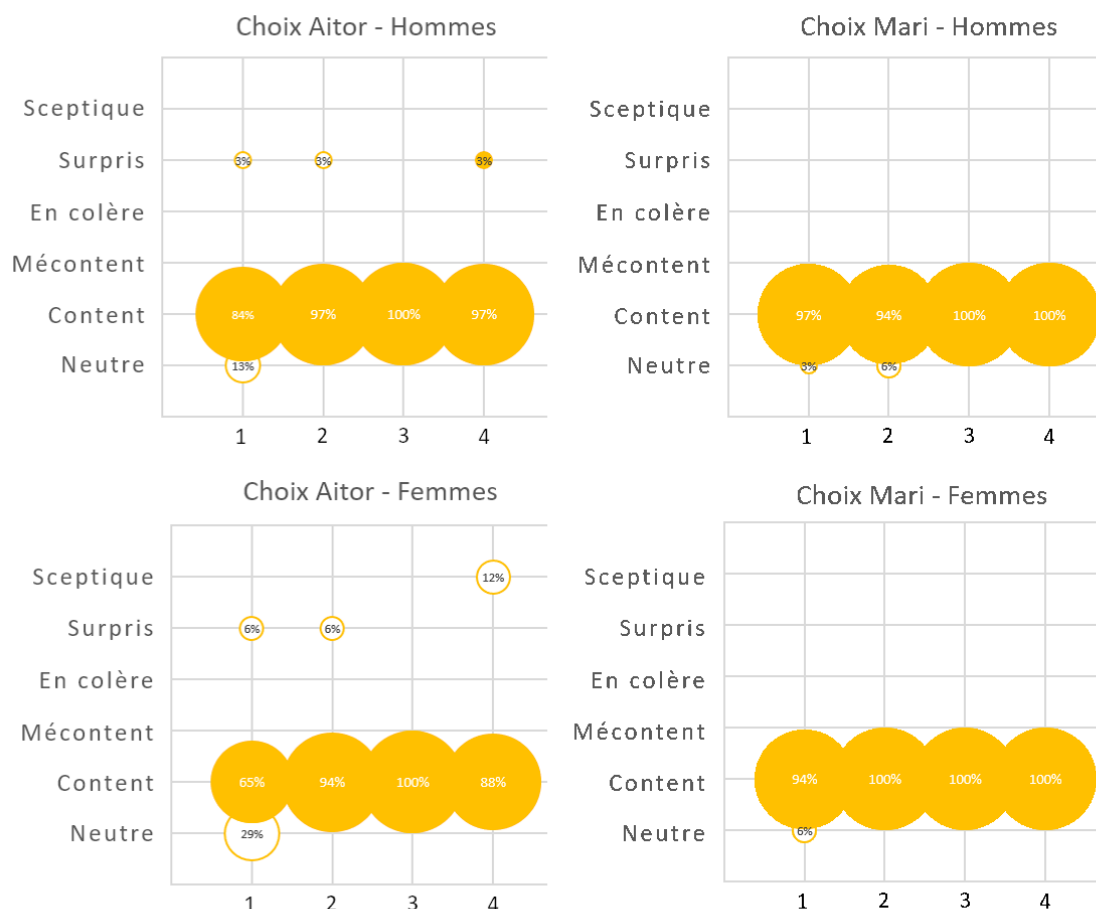


FIGURE 35.14: Répartition des choix face à l'expression *Content(e)* pour les personnages Aitor (masculin) et Mari (féminin), selon le sexe des sujets

35.13).

Au premier niveau d'intensité, les réponses fausses des sujets masculins face au personnage masculin se dirigent vers l'expression *Neutre*, quand celles des sujets féminins semblent se répartir principalement entre les expressions *Surpris* et *Neutre* (Figure 35.15).

Pour le deuxième niveau, la répartition des réponses face au personnage masculin semblent indiquer que les sujets féminins se sont plus souvent trompés pour l'expression *Sceptique*. Celles face au personnage féminin semblent indiquer en revanche une répartition des mauvaises réponses vers *Neutre* et *Sceptique*.

Néanmoins, les tests statistiques n'ont pas permis de vérifier ou de confirmer que ces différences sont significatives.

Résultats de l'expressions *En colère*

Les résultats de l'expression *En colère* montrent des taux d'erreur plus élevés pour les sujets féminins, sur tous les niveaux d'intensité des deux personnages (Figure 35.13).

La répartition des réponses (Figure 35.16) semble indiquer une proportion des réponses plus importantes vers l'expression *Mécontent(e)* sur la plupart des niveaux de chaque personnage (excepté pour le niveau 3 du personnage masculin et le niveau 2 du personnage féminin). Pour le premier niveau des deux personnages, les réponses fausses des sujets se répartissent principalement vers les expressions *Mécontent(e)* et *Neutre*. Celles du deuxième niveau du personnage féminin le font en revanche vers les expressions *Content(e)* et *Mécontent(e)*.

Là encore, les tests statistiques n'ont pas permis de vérifier ou d'établir que ces différences sont significatives.

Discussions

Les résultats ne permettent pas de confirmer les hypothèses formulées lors de l'étude préliminaire.

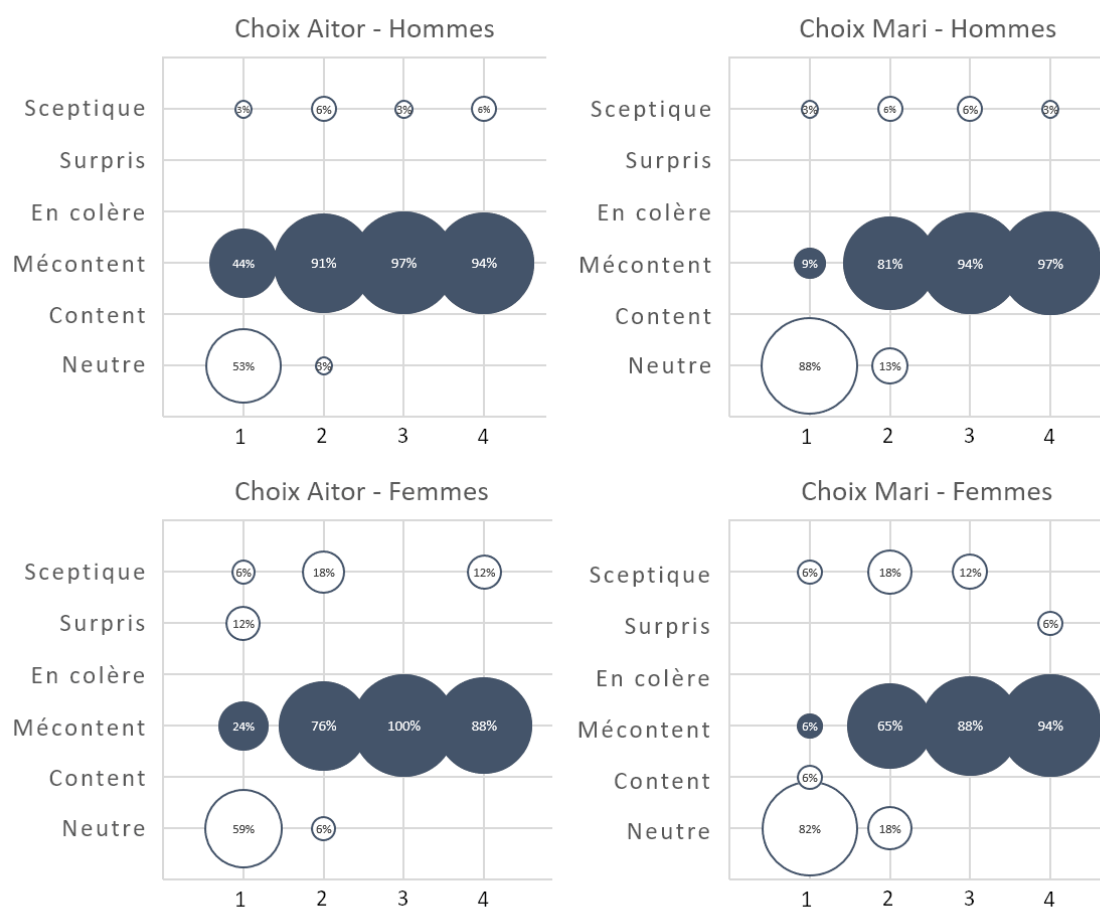


FIGURE 35.15: Répartition des choix face à l'expression *Mécontent(e)* pour les personnages Aitor (masculin) et Mari (féminin), selon le sexe des sujets

Bien que certaines différences aient été observées sur les expressions *Content(e)*, *Mécontent(e)* et *En colère*, elles ne se sont cependant pas révélées significatives lors des tests statistiques.

Le fait d'avoir analysé les résultats des expressions évaluées comme les plus pertinentes y est probablement pour beaucoup.

Ces expressions différant de celles concernées par l'étude préliminaire, il serait cependant intéressant d'analyser en quoi ces deux ensemble d'expressions diffèrent. Analyser les différences de composition en Action Units pourrait permettre d'expliquer les différences constatées lors de l'étude préliminaire. Il est ainsi possible que certaines Action Units puissent être perçues différemment selon le sexe des sujets. Des études supplémentaires seraient donc nécessaires afin d'expliquer ces effets.

Conclusions

Dans cette section, nous avons cherché à analyser si nous constatons les même variations inter-sexes que lors de l'étude préliminaire.

Bien que nous ayons observé certaines variations, elle ne se sont cependant pas avérées statistiquement significatives.

Une des principales limites des résultats vient du fait que les expressions évaluées sont plus pertinentes que lors de l'étude préliminaire. Des études supplémentaires seraient cependant nécessaires afin de déterminer l'origine des effets observés précédemment.

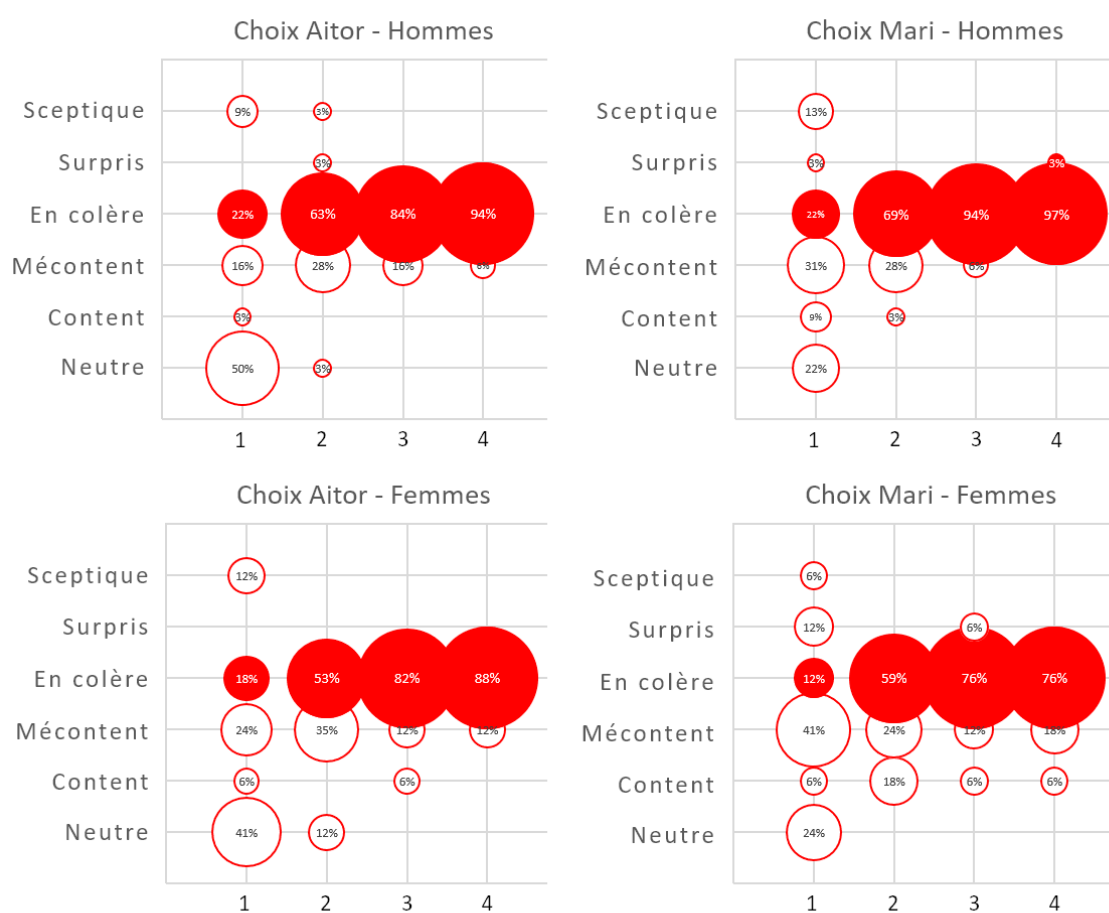


FIGURE 35.16: Répartition des choix face à l'expression *En colère* pour les personnages Aitor (masculin) et Mari (féminin), selon le sexe des sujets

**Comparaison des courbes SPC selon le sexe des
sujets et des personnages (étude préliminaire avec
Morph3D)**

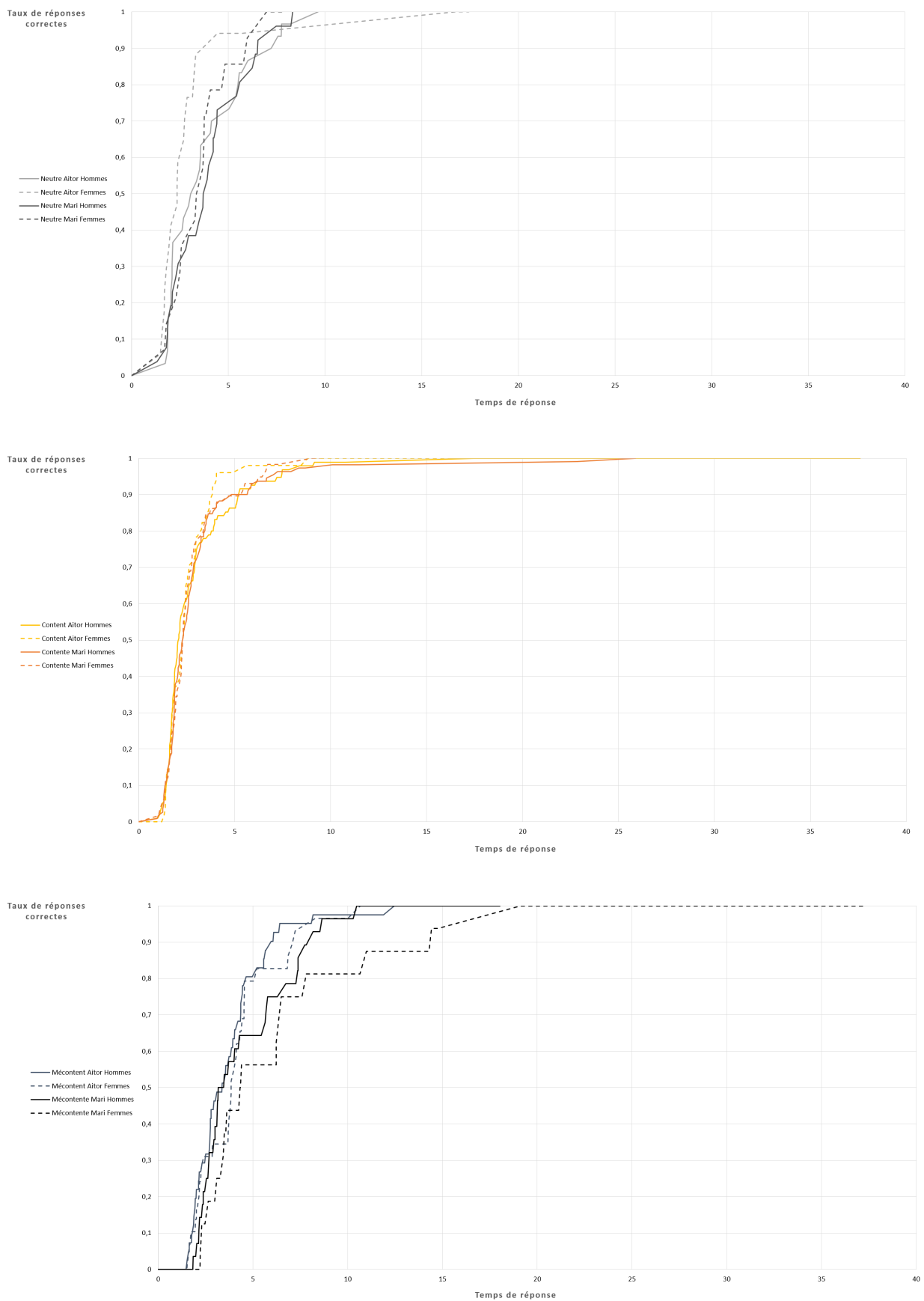


FIGURE 36.1: Courbes SPC des expressions *Neutre*, *Content(e)* et *Mécontent(e)* selon le sexe des sujets et des personnages

ANNEXE 36. COMPARAISON DES COURBES SPC SELON LE SEXE DES SUJETS ET DES PERSONNAGES (ÉTUDE PRÉLIMINAIRE AVEC MORPH3D)

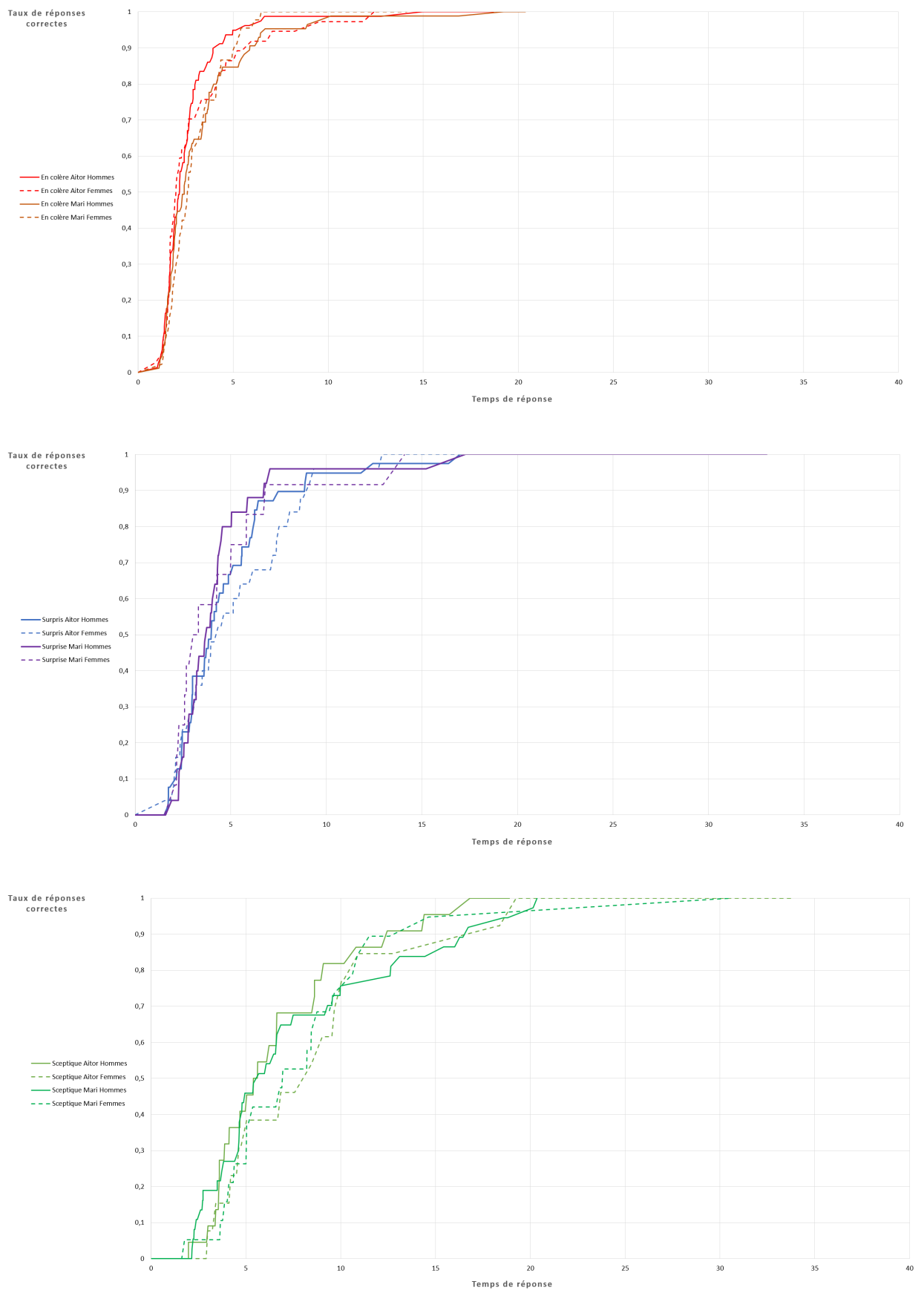


FIGURE 36.2: Courbes SPC des expressions *En colère*, *Surpris(e)* et *Sceptique* selon le sexe des sujets et des personnages

37

**Correspondances entre AUs FACS et blendshapes
CC3**

TABLE 37.1: Correspondances entre les AUs FACS et les blendshapes CC3, pour l'expression *Content(e)*

Expression	Littérature			Character Creator 3	
	Action Units		Auteurs	Blendshapes	Intensité max.
	#	Intensité			
Content(e)	1		Parke et Waters [60]	Brow_Raise_Inner_L	E
			Tinwell et al. [58]	Brow_Raise_Inner_R	E
	6	B	Friesen et al. [59]	Cheek_Raise_L	B
			Parke et Waters [60]	Cheek_Raise_R	B
			Tinwell et al. [58]		
	7		Tinwell et al. [58]	Eye_Wide_L	$0.25 \times \text{Eye_Squint_L}$
				Eye_Wide_R	$0.25 \times \text{Eye_Squint_R}$
				Eye_Squint_L	E
				Eye_Squint_R	E
	12	E	Friesen et al. [59] Parke et Waters [60] Tinwell et al. [58] Amini et Lisetti [57]	Mouth_Smile	B
	14		Parke et Waters [60]	Mouth_Dimple_L	E
Mouth_Dimple_R				E	
25	B	Amini et Lisetti [57]	Mouth_Lips_Part	B	

TABLE 37.2: Correspondances entre les AUs FACS et les blendshapes CC3, pour l'expression *Mécontent(e)*

Expression	Littérature			Character Creator 3	
	Action Units		Auteurs	Blendshapes	Intensité max.
	#	Intensité			
Mécontent(e)	1	E	Friesen et al. [59]	Brow_Raise_Inner_L	E
			Parke et Waters [60] Tinwell et al. [58] Amini et Lisetti [57]	Brow_Raise_Inner_R	E
	4	C	Friesen et al. [59]	Brow_Drop_L	C
			Parke et Waters [60] Tinwell et al. [58] Amini et Lisetti [57]	Brow_Drop_R	C
	15	E	Friesen et al. [59] Parke et Waters [60] Tinwell et al. [58] Amini et Lisetti [57]	Mouth_Frown	E
	23		Parke et Waters [60] Tinwell et al. [58]	Tight	A
38		Tinwell et al. [58]	Nose_Nostril_Flare	E	

TABLE 37.3: Correspondances entre les AUs FACS et les blendshapes CC3, pour l'expression *En colère*

Expression	Littérature			Character Creator 3	
	Action Units		Auteurs	Blendshapes	Intensité max.
	#	Intensité			
En colère	2		Parke et Waters [60]	Brow_Raise_Outer_L Brow_Raise_Outer_R	E E
	4	E	Friesen et al. [59] Parke et Waters [60] Tinwell et al. [58] Amini et Lisetti [57]	Brow_Drop_L	E
				Brow_Drop_R	E
	5	B	Friesen et al. [59] Amini et Lisetti [57]	Eye_Wide_L	B
				Eye_Wide_R	B
	7	B	Friesen et al. [59] Parke et Waters [60] Tinwell et al. [58] Amini et Lisetti [57]	Eye_Squint_L	B
				Eye_Squint_R	B
				Eye_Wide_L	$0.25 \times \text{Eye_Squint_L}$
				Eye_Wide_R	$0.25 \times \text{Eye_Squint_R}$
	9		Parke et Waters [60]	Nose_Scrunch	E
	10		Parke et Waters [60]	Mouth_Top_Lip_Up	E
	17		Tinwell et al. [58]	Mouth_Bottom_Lip_Under	E
				Mouth_Top_Lip_Up	$0.5 \times \text{Mouth_Bottom_Lip_Under}$
20		Parke et Waters [60]	Mouth_Widen	E	
23	A	Friesen et al. [59] Amini et Lisetti [57]	Tight	A	
24	B	Tinwell et al. [58] Amini et Lisetti [57]	Mouth_Lips_Tuck	B	
26		Parke et Waters [60]	CC_Base_JawRoot	B	

TABLE 37.4: Correspondances entre les AUs FACS et les blendshapes CC3, pour l'expression *Surpris(e)*

Expression	Littérature			Character Creator 3	
	Action Units		Auteurs	Blendshapes	Intensité max.
	#	Intensité			
Surpris(e)	1	E	Friesen et al. [59] Parke et Waters [60] Tinwell et al. [58] Amini et Lisetti [57]	Brow_Raise_Inner_L	E
				Brow_Raise_Inner_R	E
	2	E	Friesen et al. [59] Parke et Waters [60] Tinwell et al. [58] Amini et Lisetti [57]	Brow_Raise_Outer_L	E
				Brow_Raise_Outer_R	E
	5	B	Friesen et al. [59] Parke et Waters [60] Tinwell et al. [58] Amini et Lisetti [57]	Eye_Wide_L	E
				Eye_Wide_R	E
	15		Parke et Waters [60]	Mouth_Frown	B
	16		Parke et Waters [60]	Mouth_Bottom_Lip_Down	E
	20		Parke et Waters [60]	Mouth_Widen	E
	26	E	Friesen et al. [59] Parke et Waters [60] Tinwell et al. [58] Amini et Lisetti [57]	CC_Base_JawRoot	B

TABLE 37.5: Correspondances entre les AUs FACS et les blendshapes CC3, pour l'expression *Sceptique*

Expression	Littérature			Character Creator 3	
	Action Units		Auteurs	Blendshapes	Intensité max.
	#	Intensité			
Sceptique	4		Benitez-Quiroz et al. [61]	Brow_Drop_L	E
				Brow_Drop_R	E
	14		Benitez-Quiroz et al. [61]	Mouth_Dimple_L	E
				Mouth_Dimple_R	E
	17		Benitez-Quiroz et al. [61]	Mouth_Bottom_Lip_Under	E
				Mouth_Top_Lip_Up	$0.5 \times \text{Mouth_Bottom_Lip_Under}$
24		Benitez-Quiroz et al. [61]	Mouth_Lips_Tuck	B	

38

Ajustements des blendshapes CC3

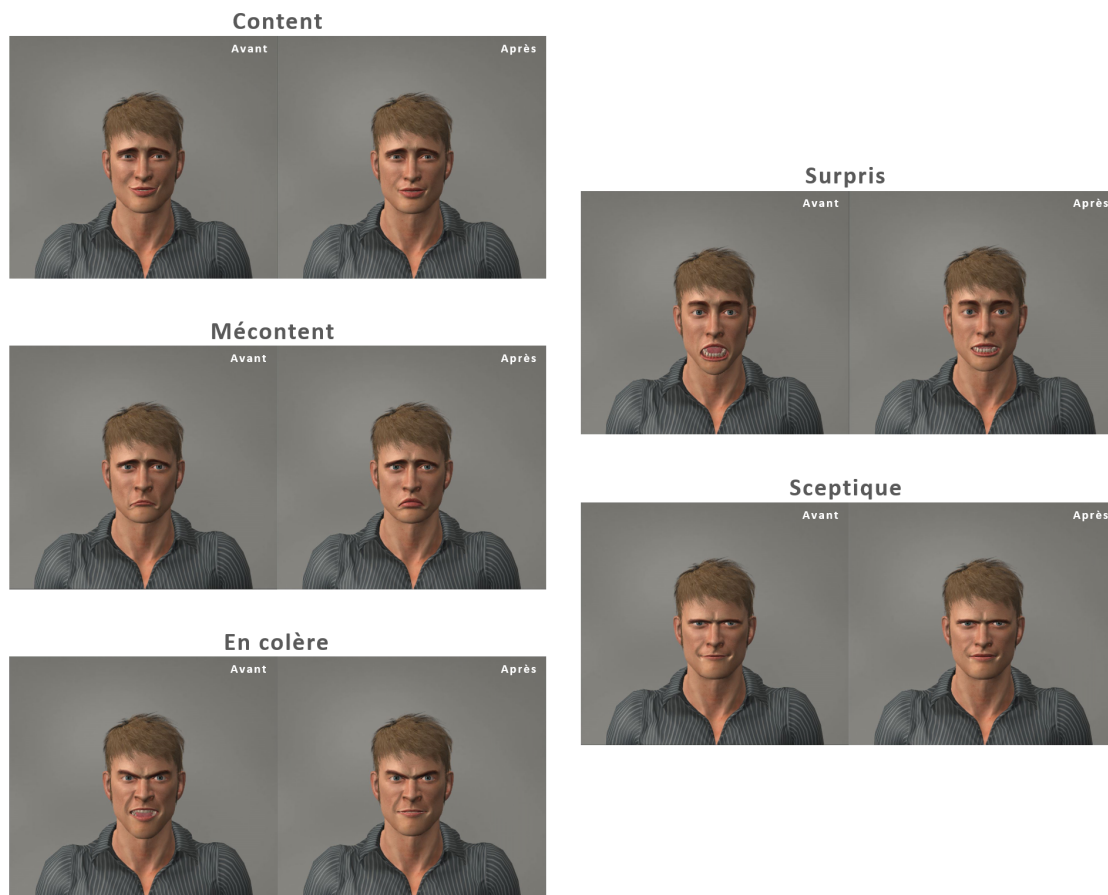


FIGURE 38.1: Ajustements des blendshapes CC3

Pour l'expression *Content(e)*, nous avons ainsi réduit l'intensité maximale du blendshape lié à l'étirement du coin des lèvres (*Mouth_Smile*, AU 12), pour qu'elle soit de 30% de sa valeur maximale.

Lors de l'analyse de la littérature, nous n'avons pas relevé d'intensité concernant la tension refermante des lèvres (AU 23) pour l'expression *Mécontent(e)*. Après l'avoir essayé avec la valeur maximale du blendshape *Tight*, nous avons entrepris de réduire son intensité maximale à 15% (A) de cette valeur. Nous nous sommes en effet inspiré de l'expression *En colère*, pour laquelle nous avons en revanche relevé cette intensité dans la littérature.

Pour l'ouverture de la mâchoire (AU 26), utilisée par les expressions *En colère* et *Sceptique*, nous avons également réduit l'intensité maximale du blendshape *CC_Base_JawRoot*. Nous l'avons fixé à 30% (B) de sa valeur maximale, afin d'éviter que la déformation ne soit trop importante.

Nous avons également réduit la valeur maximale à 30% (B) pour l'abaissement du coin des lèvres (AU 15) de l'expression *Surpris(e)*.

39

Résultats des dessins des expressions

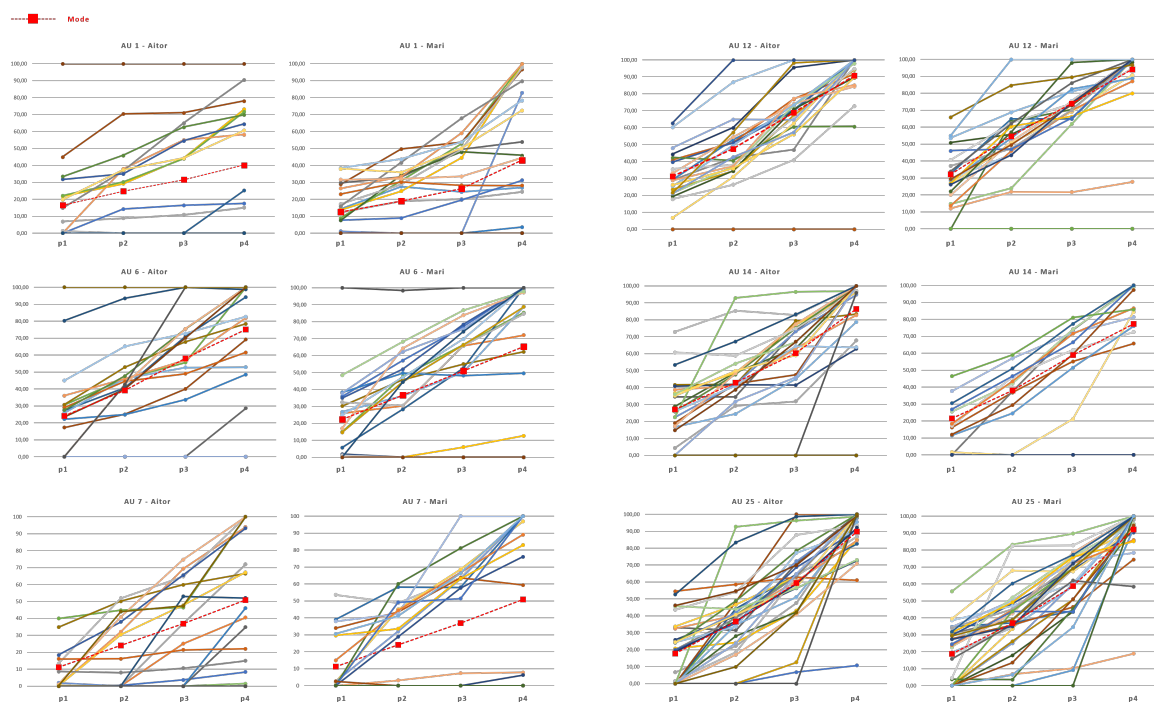


FIGURE 39.1: Résultats des dessins comonotones majoritaires de l'expression $Content(e)$

TABLE 39.1: Résultats des dessins de l'expression $Content(e)$

Expression	AU	Personnage	δ	% comonotones	Modes			
					Niv. 1	Niv. 2	Niv. 3	Niv. 4
Content(e)	1	Aitor	2.38	56%	16.48	24.77	31.56	40.27
		Mari	3.57	78%	12.57	18.95	26.20	43.07
	6	Aitor	2.78	72%	24.14	39.08	58.04	75.11
		Mari	4.16	69%	22.31	36.65	50.99	65.37
	7	Aitor	3.09	75%	0.00	0.00	25.05	40.53
		Mari	4.79	69%	11.20	24.07	36.82	50.82
	12	Aitor	2.59	84%	31.20	47.55	68.92	90.78
		Mari	4.18	81%	32.13	54.74	74.00	94.15
	14	Aitor	3.52	81%	27.12	42.92	60.33	86.39
		Mari	4.23	63%	21.46	38.08	58.96	77.29
25	Aitor	4.21	94%	17.82	36.59	59.46	86.73	
	Mari	4.47	100%	18.76	36.98	58.76	92.07	

TABLE 39.2: Résultats des dessins de l'expression $Mécontent(e)$

Expression	AU	Personnage	δ	% comonotones	Modes			
					Niv. 1	Niv. 2	Niv. 3	Niv. 4
Mécontent(e)	1	Aitor	2.36	53%	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mari	2.20	56%	8.44	13.96	21.45	31.53
	4	Aitor	2.69	78%	25.34	42.23	63.96	88.82
		Mari	3.50	88%	28.52	46.06	65.07	86.69
	15	Aitor	2.90	63%	21.49	37.54	56.93	71.16
		Mari	3.31	75%	22.32	34.80	50.93	72.61
	23	Aitor	2.83	69%	0.00	16.08	25.67	41.38
		Mari	3.04	56%	10.67	18.01	32.91	48.51
	38	Aitor	3.81	88%	0.00	26.12	49.37	77.75
		Mari	3.43	88%	12.76	33.96	58.27	85.38

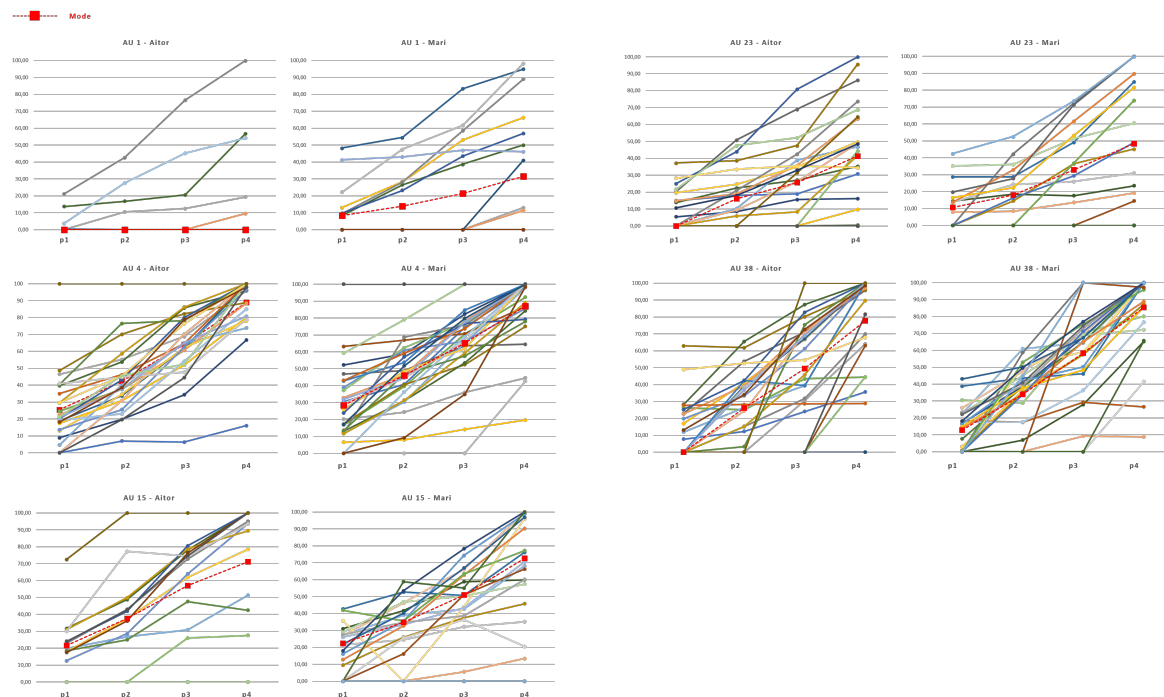


FIGURE 39.2: Résultats des dessins comonotones majoritaires de l'expression *Mécontent(e)*

TABLE 39.3: Résultats des dessins de l'expression *En colère*

Expression	AU	Personnage	δ	% comonotones	Modes			
					Niv. 1	Niv. 2	Niv. 3	Niv. 4
En colère	2	Aitor	2.48	72%	24.47	34.74	50.92	63.47
		Mari	2.92	53%	0.00	0.00	34.87	46.81
	4	Aitor	3.23	72%	37.63	49.54	71.44	91.90
		Mari	3.48	78%	35.38	55.94	76.87	96.20
	5	Aitor	0.68	78%	5.57	8.95	13.23	17.55
		Mari	1.00	72%	5.85	10.84	14.42	18.26
	7	Aitor	2.73	78%	22.29	35.79	52.92	70.22
		Mari	4.00	72%	23.38	43.34	57.67	73.04
	9	Aitor	4.08	84%	25.62	38.79	59.30	80.29
		Mari	3.25	78%	23.14	39.73	57.21	82.25
	10	Aitor	4.14	72%	22.19	37.38	50.75	76.33
		Mari	4.09	53%	30.83	50.13	63.79	84.02
	17	Aitor	3.76	72%	0.00	22.41	38.92	43.91
		Mari	2.60	53%	18.66	30.36	47.17	60.02
	20	Aitor	3.34	66%	0.00	0.00	30.56	41.89
		Mari	3.18	63%	0.00	0.00	35.82	47.39
	23	Aitor	3.36	78%	0.00	13.85	19.51	36.15
		Mari	3.24	56%	0.00	0.00	0.00	0.00
24	Aitor	3.60	66%	0.00	14.74	23.12	40.94	
	Mari	3.56	63%	14.59	22.52	32.86	49.20	
26	Aitor	3.47	81%	0.00	16.49	36.57	66.48	
	Mari	4.42	91%	0.00	20.04	38.57	65.57	

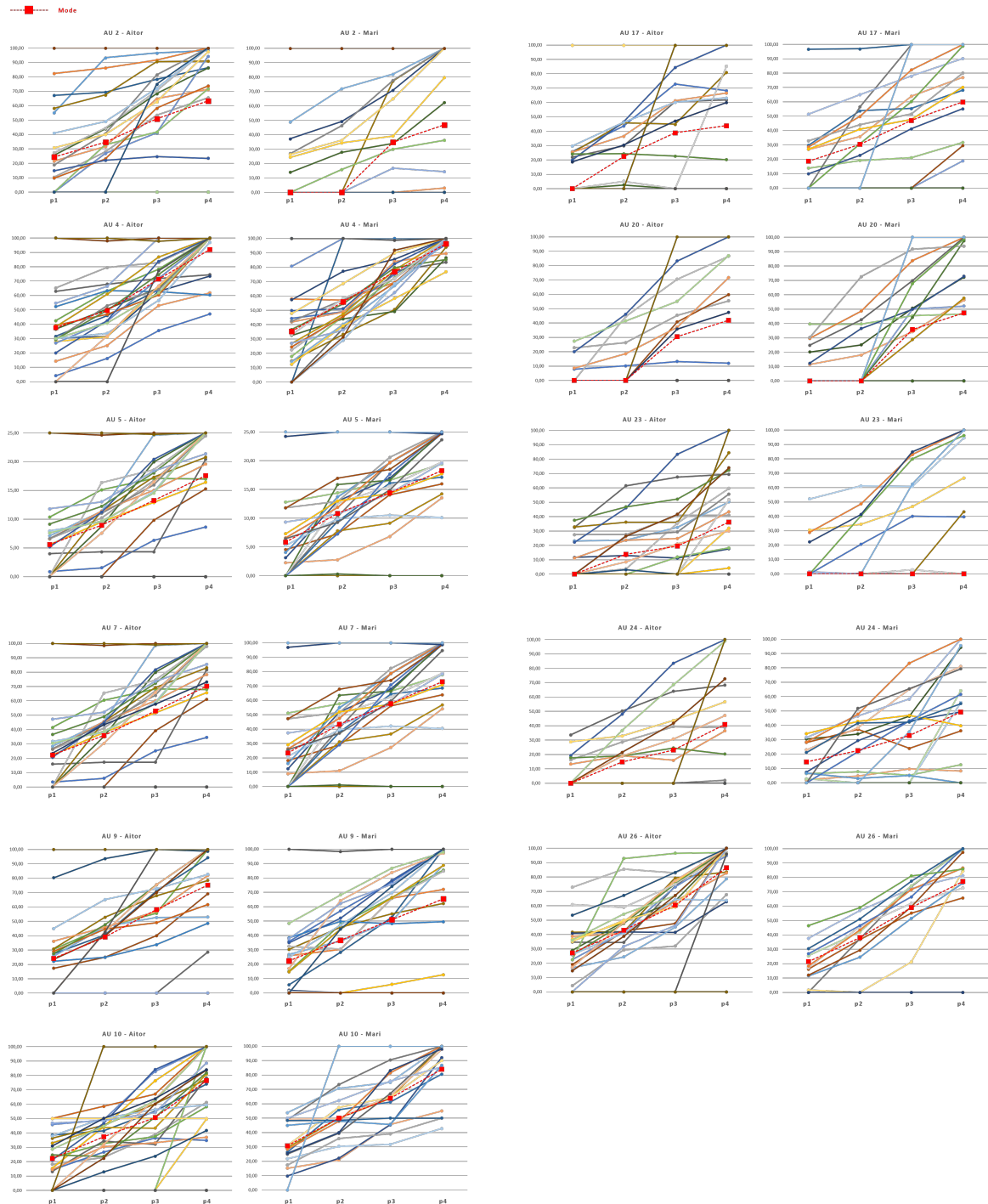


FIGURE 39.3: Résultats des dessins comonotones majoritaires de l'expression *En colère*

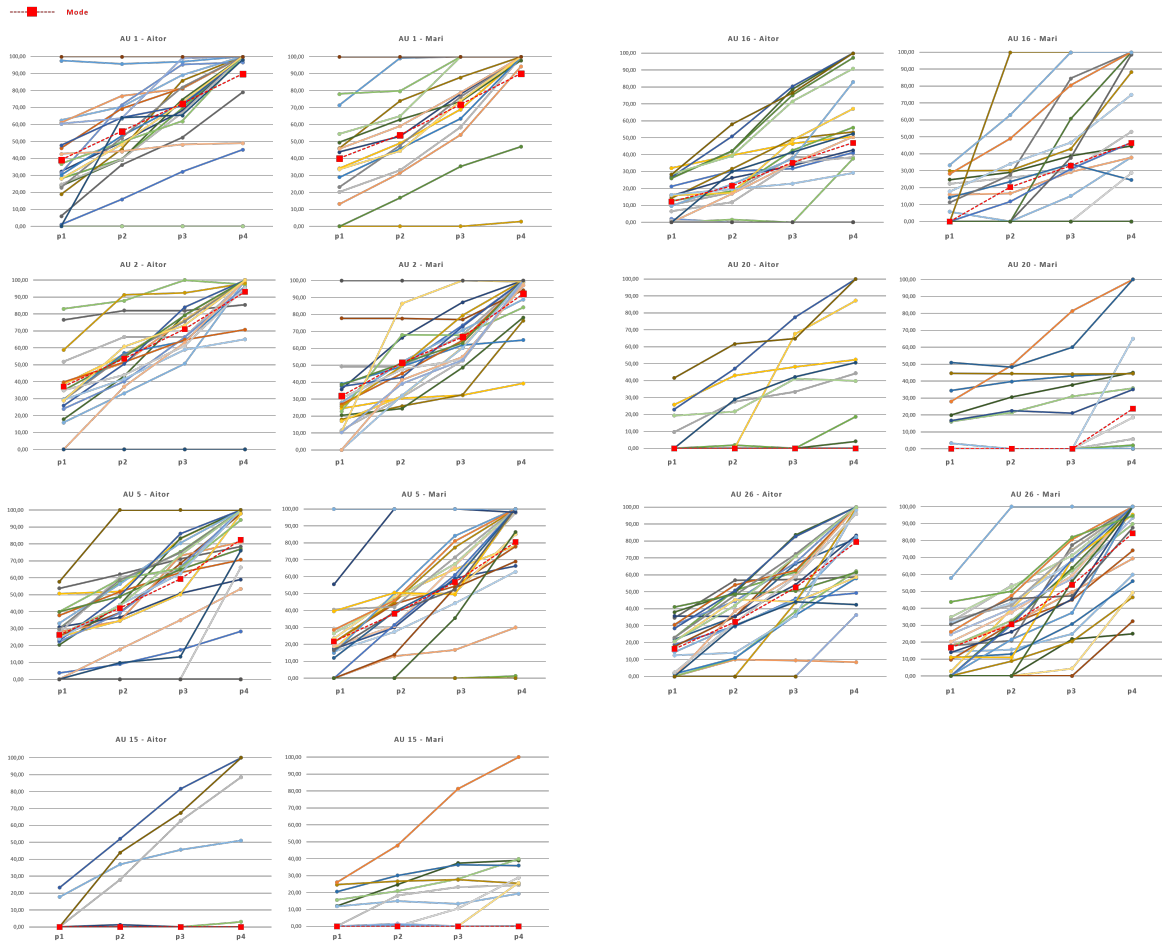


FIGURE 39.4: Résultats des dessins comonotones majoritaires de l'expression *Surpris(e)*

TABLE 39.4: Résultats des dessins de l'expression *Surpris(e)*

Expression	AU	Personnage	δ	% comonotones	Modes			
					Niv. 1	Niv. 2	Niv. 3	Niv. 4
Surpris(e)	1	Aitor	3.30	72%	39.22	56.00	72.41	89.92
		Mari	3.31	50%	40.19	53.85	71.82	90.14
	2	Aitor	2.87	72%	37.06	53.64	71.10	93.06
		Mari	3.38	72%	31.84	51.58	66.72	92.24
	5	Aitor	2.42	75%	26.19	41.98	59.23	82.51
		Mari	3.35	72%	21.67	38.06	56.76	80.53
	15	Aitor	2.05	63%	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mari	2.44	75%	0.00	0.00	0.00	0.00
	16	Aitor	2.99	75%	12.21	21.53	35.23	47.05
		Mari	3.19	75%	0.00	20.32	33.05	46.84
	20	Aitor	2.90	56%	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mari	3.40	66%	0.00	0.00	0.00	23.71
26	Aitor	3.81	81%	16.24	32.24	52.57	79.35	
	Mari	2.65	84%	16.66	30.52	53.79	84.71	

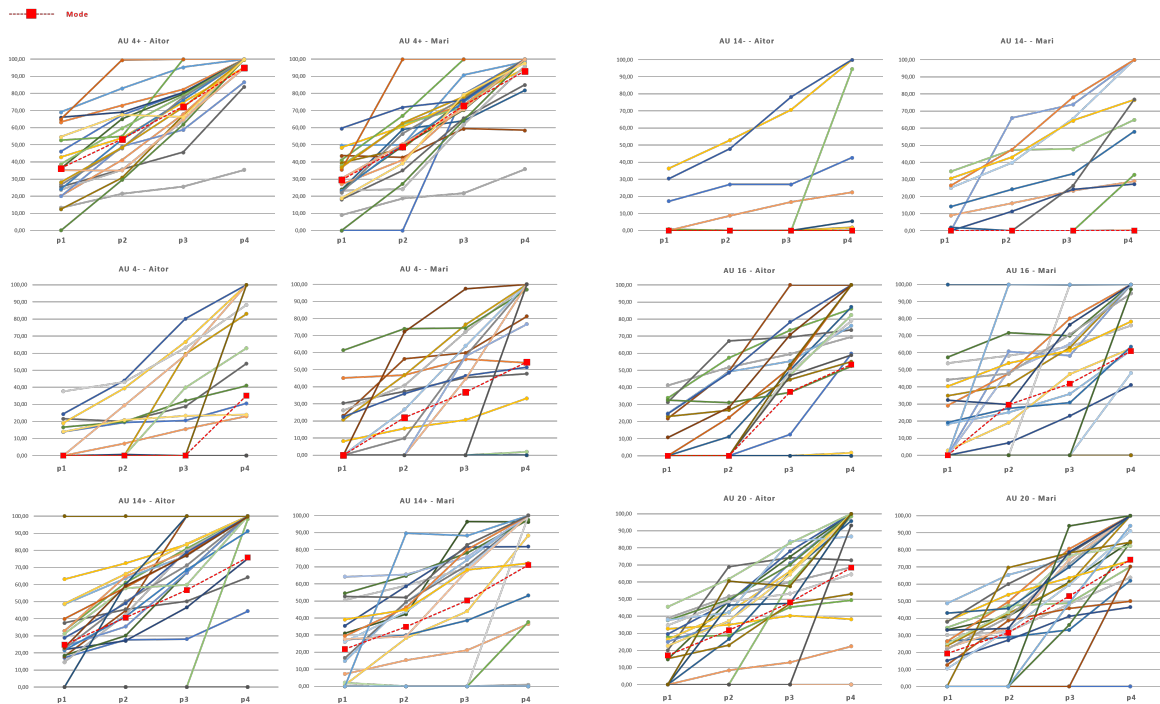


FIGURE 39.5: Résultats des dessins comonotones majoritaires de l'expression *Sceptique*

TABLE 39.5: Résultats des dessins de l'expression *Sceptique*

Expression	AU	Personnage	δ	% comonotones	Modes			
					Niv. 1	Niv. 2	Niv. 3	Niv. 4
Sceptique	4L	Aitor	2.05	81%	22.14	30.73	42.00	59.85
		Mari	2.41	75%	20.27	33.17	51.26	68.59
	4R	Aitor	2.05	56%	18.64	31.45	50.92	69.23
		Mari	2.41	59%	21.04	39.22	60.47	81.31
	4+	Aitor	2.05	66%	36.39	53.40	72.39	95.30
		Mari	2.41	69%	29.49	49.02	72.98	93.09
	4-	Aitor	2.05	72%	0.00	0.00	0.00	35.07
		Mari	2.41	66%	0.00	22.03	36.83	54.43
	14L	Aitor	2.56	75%	21.72	35.60	49.87	66.82
		Mari	2.38	78%	17.81	29.84	42.75	57.23
	14R	Aitor	2.56	75%	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mari	2.38	63%	0.00	0.00	0.00	39.97
	14+	Aitor	2.56	81%	24.77	40.65	56.78	75.88
		Mari	2.38	69%	21.89	34.90	50.29	71.1
	14-	Aitor	2.56	69%	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mari	2.38	72%	0.00	0.00	0.00	0.00
17	Aitor	2.97	75%	0.00	0.00	37.49	53.41	
	Mari	2.86	78%	0.00	29.57	41.84	60.92	
24	Aitor	3.32	75%	17.03	31.88	48.12	68.44	
	Mari	4.09	78%	19.33	31.48	52.96	74.30	

Exemple d'interpolations d'ordre supérieur à 1, pour la définition de niveaux d'intensité intermédiaires

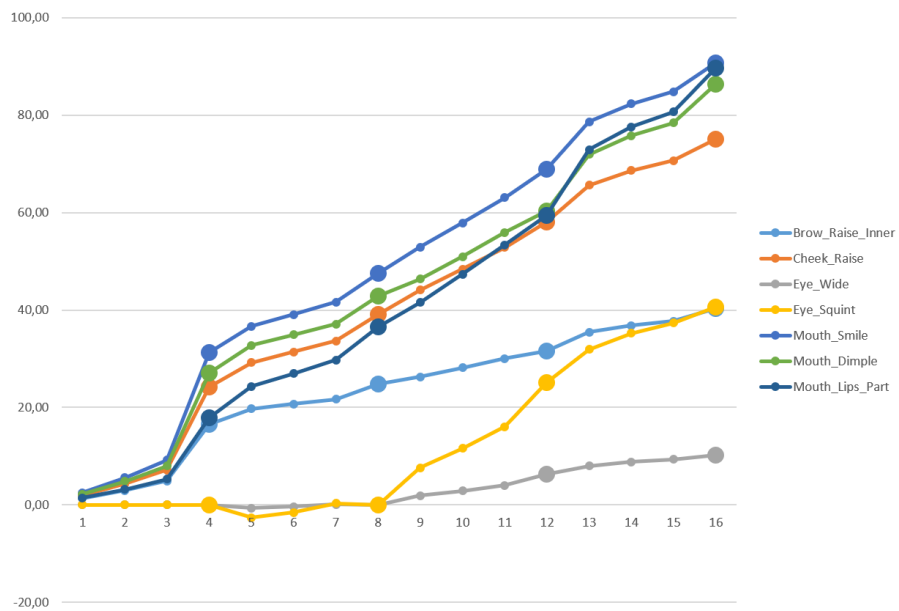


FIGURE 40.1: Exemple d'interpolations d'ordre 2, pour l'expression $Content(e)$

41

**Ordre de positionnement des personnages du
prototype de tri**

TABLE 41.1: Ordres de positionnement des personnages selon leur intensité, utilisés pour l'expérimentation visant à fixer les niveaux d'intensité

Expression	Personnage	Ordre																
		14	6	12	10	2	0	9	7	4	8	11	15	16	3	13	5	1
Content(e)	Aitor	14	6	12	10	2	0	9	7	4	8	11	15	16	3	13	5	1
	Mari	6	10	1	7	11	3	16	13	5	14	15	4	12	8	9	0	2
Mécontent(e)	Aitor	6	0	5	7	4	1	11	3	13	10	9	12	2	16	8	15	14
	Mari	7	0	12	2	8	14	6	13	11	1	10	9	5	16	4	15	3
En colère	Aitor	8	5	12	10	4	7	9	13	11	15	3	14	6	2	0	1	16
	Mari	5	10	14	6	13	12	3	0	4	15	9	2	8	7	11	16	1
Surpris(e)	Aitor	16	4	2	11	7	13	15	12	9	1	14	5	0	8	6	3	10
	Mari	16	11	1	13	10	8	7	9	4	0	3	12	14	15	6	5	2
Sceptique	Aitor	5	0	9	2	7	1	10	11	4	13	12	6	8	3	16	14	15
	Mari	10	7	5	9	3	8	15	16	2	13	6	11	1	4	14	12	0

TABLE 41.2: Ordres de positionnement des expressions dessinées à partir de la littérature, utilisés pour la pré-sélection des expressions

Expression	Personnage	Ordre						
		[57]	0	[60]	[59]	[58]	C	
Content(e)	Aitor	[57]	0	[60]	[59]	[58]	C	
	Mari	C	[59]	[58]	[60]	0	[57]	
Mécontent(e)	Aitor	0	[58]	[60]	[59, 57]			
	Mari	0	[59, 57]	[58]	[60]			
En colère	Aitor	[58]	[60]	[59]	[57]	0	C	
	Mari	[58]	[59]	0	[60]	[57]	C	
Surpris(e)	Aitor	[59, 58, 57]	[60]	0				
	Mari	[60]	0	[59, 58, 57]				

0 : expression neutre

[59] : Friesen et al.

[60] : Parke et Waters

[58] : Tinwell et al.

[57] : Amini et Lisetti

C : expression complète, utilisant toutes les AU

TABLE 41.3: Ordres de positionnement des expressions proposées par l'outil, utilisés pour la pré-sélection des expressions

Expression	Personnage	Ordre															
		Préfixe	Suffixe														
			6	12	10	2	0	9	7	4	8	11	3	5	1		
Content(e)	Aitor	Happy_	6	12	10	2	0	9	7	4	8	11	3	5	1		
	Mari		6	10	1	7	11	3	5	4	12	8	9	0	2		
Mécontent(e)	Aitor	Sad_	6	0	5	7	4	1	11	3	10	9	12	2	8		
	Mari		7	0	12	2	8	6	11	1	10	9	5	4	3		
En colère	Aitor	Angry_	8	5	12	10	4	7	9	11	3	6	2	0	1		
	Mari		5	10	6	12	3	0	4	9	2	8	7	11	1		
Surpris(e)	Aitor	Surprise_	4	2	11	7	12	9	1	5	0	8	6	3	10		
	Mari		11	1	10	8	7	9	4	0	3	12	6	5	2		

0 : expression neutre

**Exemple d'application de la méthodologie proposée
pour la définition des niveaux d'intensité**

TABLE 42.1: Exemple de tris générés par une population de 4 sujets

Tris	Ordre																
O	E_N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
T_1	E_N	E_N	E_N	E_N	E_N	E_N	E_N	10	4	12	13	11	14	15	E_E	E_E	E_E
T_2	E_N	E_N	E_N	E_N	E_N	5	7	8	6	9	12	10	13	11	15	14	16
T_3	E_N	E_N	E_N	E_N	E_N	E_N	E_N	E_N	7	9	10	11	12	13	14	E_E	E_E
T_4	E_N	E_N	E_N	E_N	E_N	7	E_N	10	6	9	8	12	13	11	15	14	E_E

Tris	E_N	E_E
O	{0}	{∅}
T_1	{0, 1, 2, 3, 5, 6, 9}	{7, 8, 16}
T_2	{0, 1, 2, 3, 4}	{∅}
T_3	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8}	{15, 16}
T_4	{0, 1, 2, 3, 4, 5}	{16}

TABLE 42.2: Résultat des calculs des scores de début de perception Sd , pour une position i donnée du premier niveau d'intensité (calcul de i_1)

	Rang i potentiel												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sd_1	10	11	12	13	14	15	16	17	16	15	14	13	12
Sd_2	12	13	14	15	16	17	16	15	14	13	12	11	10
Sd_3	9	10	11	12	13	14	15	16	17	16	15	14	13
Sd_4	11	12	13	14	15	16	15	16	15	14	13	12	11
Sd	42	46	50	54	58	62	62	64	62	58	54	50	46
i_1	7												
$O(i_1)$	7												

Prenons l'exemple d'une population de 4 sujets pour lesquels les résultats concernant l'expression *En colère* d'Aitor, présentés en Table 42.1.

I Calcul de i_1 , la valeur d'intensité du premier niveau

La Table 42.2 montre les scores obtenus pour déterminer le début de la perception, i.e. la valeur d'intensité i_1 .

Prenons le cas de la position potentielle du début de la perception au rang 8 de notre liste O . Pour $i = 8$, calculons le score de début de perception Sd_1 , correspondant au tri effectué par le sujet 1. L'ensemble d'expressions neutres (E_N) est présent 7 fois avant le rang i , puis absent 9 fois à partir de ce même rang. Le score de début de perception $Sd_1(8)$ est donc de 16 (7+9).

Lorsqu'on additionne les scores de tous les sujets pour chaque rang i , nous obtenons :

$$i_1 = \arg \max_{i \in [0;12]} Sd(i) = 7$$

La valeur la plus représentative du premier niveau d'intensité, correspondant au début de la perception, est donc $i_1 = O(7) = 7$.

II Calcul de i_4 , la valeur d'intensité du dernier niveau

La Table 42.3 montre les scores obtenus pour déterminer la fin de la perception de la perception pertinente, i.e. la valeur d'intensité i_4 .

Prenons le cas de la position potentielle de la fin de la perception pertinente au rang 13 de notre liste O . Pour $i = 13$, calculons le score de fin de perception pertinente Sf_1 , correspondant au tri effectué par le sujet 4. L'ensemble d'expressions exagérées ou non pertinentes (E_E) est absent 14 fois jusqu'à le rang i , puis est présent 1 fois après même rang. Le score de fin de la perception pertinente $Sf_4(13)$ est donc de 15 (14+1).

Lorsqu'on additionne les scores de tous les sujets pour chaque rang i , nous obtenons :

$$i_4 = \arg \max_{i \in [3;16]} Sf(i) = 14$$

La valeur la plus représentative du dernier niveau d'intensité, correspondant à la fin de la perception pertinente, est donc $i_4 = O(14) = 14$.

TABLE 42.3: Résultat des calculs des scores de fin de perception Sf , pour une position i donnée du dernier niveau d'intensité (calcul de i_4)

	Rang i potentiel													
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Sf_1	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	16	15	14
Sf_2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Sf_3	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	16	15
Sf_4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	16
Sf	23	27	31	35	39	43	47	51	55	59	63	64	63	61
i_4													14	
$O(i_4)$													14	

TABLE 42.4: Résultat des calculs des scores de positionnement intermédiaire Sm , pour un couple de positions (k, l) données pour les niveaux d'intensité intermédiaires (2,3) (calcul de i_2 et i_3)

k	l	Sm_1	Sm_2	Sm_3	Sm_4	Sm	i_2	i_3	$O(i_2)$	$O(i_3)$
8	9	0.60	1.00	1.00	0.80	3.40				
8	10	0.50	1.50	1.50	1.25	4.75				
8	11	0.33	1.00	1.66	1.66	4.65				
8	12	0.25	1.00	1.75	1.00	4.00				
8	13	0.40	0.60	1.80	0.60	3.40				
9	10	0.50	2.50	3.00	1.75	7.75	9	10	9	10
9	11	0.33	1.66	3.00	1.50	6.49				
9	12	0.33	1.66	3.00	0.83	5.82				
9	13	0.50	1.25	3.00	0.50	5.25				
10	11	0.33	1.32	3.00	1.33	5.98				
10	12	0.50	1.41	3.00	0.83	5.74				
10	13	0.33	1.32	3.00	0.66	5.31				
11	12	1.25	1.00	3.00	1.25	6.50				
11	13	0.75	0.50	3.00	1.25	5.50				
12	13	0.40	0.60	3.00	0.60	4.60				

III Calcul de i_2 et i_3 , les valeurs des niveaux intermédiaires

Sur la liste ordonnée de référence, nous venons de retenir le rang $i_1 = 7$ pour la position du début de la perception, ainsi que le rang $i_4 = 14$ pour la position de la fin de la perception pertinente. Les positions des niveaux intermédiaires seront donc définie par les rangs $i_2 \in [8; 12]$ et $i_3 \in [9; 13]$.

La Table 42.4 présente les scores obtenus pour déterminer l'intensité des niveaux intermédiaires, i.e. les valeurs d'intensité i_2 et i_3 , situés entre le début et la fin de la perception.

Prenons par exemple le cas d'une position $k = 8$ dans la liste O pour le 2^{ème} niveau, ainsi que d'une position $l = 12$ pour le 3^{ème} niveau. Calculons le score de positionnement intermédiaire pour le sujet 3, Sm_3 :

- Sur l'intervalle $[7; 8[$ correspondant au segment potentiel du 1^{er} niveau, $O([7; 8]) = 7$ et $T_3([7; 8]) = E_N = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8\}$.
Comme nous avons $7 \notin E_N$, le score de ce segment est de 0.
- Sur l'intervalle $[8; 12[$ correspondant au segment potentiel du 2^{ème} niveau, $O([8; 12]) = \{8, 9, 10, 11\}$ et $T_3([8; 12]) = \{7, 9, 10, 11\}$.
Nous avons 3 intensités présentes dans O et $T_3([8; 12]) : \{9, 10, 11\} \in T_3([8; 12])$
La taille de segment est de 4 ($l - k = 12 - 8$).
Le score de ce segment est donc de 0.75 (3/4).
- Sur l'intervalle $[12; 14[$ correspondant au segment potentiel du 3^{ème} niveau, $O([12; 14]) = \{12, 13\}$ et $T_3([12; 14]) = \{12, 13\}$.
Nous avons 2 intensités présentes dans O et $T_3([12; 14]) : \{12, 13\} \in T_3([12; 14])$
La taille de segment est de 2 ($i_4 - l = 14 - 12$).
Le score de ce segment est donc de 1.00 (2/2).

Le score Sm des positions (8, 12) du sujet 3 est ainsi de 1.75 (0 + 0.75 + 1.00).

III. CALCUL DE I_2 ET I_3 , LES VALEURS DES NIVEAUX INTERMÉDIAIRES

Tris	Ordre																
O	E_N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
T_1	E_N	E_N	E_N	E_N	E_N	E_N	E_N	10	4	12	13	11	14	15	E_E	E_E	E_E
T_2	E_N	E_N	E_N	E_N	E_N	5	7	8	6	9	12	10	13	11	15	14	16
T_3	E_N	E_N	E_N	E_N	E_N	E_N	E_N	E_N	7	9	10	11	12	13	14	E_E	E_E
T_4	E_N	E_N	E_N	E_N	E_N	7	E_N	10	6	9	8	12	13	11	15	14	E_E
NEUTRES								1	2			3		4	EXAG.		

FIGURE 42.1: Résultats obtenus

Lorsqu'on additionne les scores de tous les sujets pour chaque couple de rangs (k, l) , nous obtenons :

$$x_2 = O(i_2max) = 9, \quad x_3 = O(i_3max) = 10 \quad | \quad (i_2max, i_3max) = \underset{k \in [8;13[, l \in [9;14[}{\operatorname{arg\,max}} \quad Sm(k, l)$$

Les valeurs les plus représentatives pour les niveaux d'intensité intermédiaires sont donc :

$$i_2 = O(8) = 8$$

$$i_3 = O(12) = 12$$

Les résultats obtenus pour chacun des niveaux à partir de leurs valeurs d'intensité (i_1, i_2, i_3, i_4) sont ainsi représentés sur la Figure 42.1.

**Valeurs des niveaux d'intensité établis à partir du
prototype de tri**

TABLE 43.1: Valeurs des blendshapes pour les niveaux de l'expression *Content(e)*

Expression	Blendshape	Personnage	Niv. 1	Niv. 2	Niv. 3	Niv. 4
Content(e)	Brow_Raise_Inner_L	Aitor	18.55	28.17	31.56	38.09
		Mari	15.76	18.95	26.20	34.63
	Brow_Raise_Inner_R	Aitor	18.55	28.17	31.56	38.09
		Mari	15.76	18.95	26.20	34.63
	Cheek_Raise_L	Aitor	27.88	48.56	58.04	70.84
		Mari	29.48	36.65	50.99	58.18
	Cheek_Raise_R	Aitor	27.88	48.56	58.04	70.84
		Mari	29.48	36.65	50.99	58.18
	Eye_Wide_L	Aitor	0.00	3.13	6.26	9.17
		Mari	3.01	6.02	9.20	10.96
	Eye_Wide_R	Aitor	0.00	3.13	6.26	9.17
		Mari	3.01	6.02	9.20	10.96
	Eye_Squint_L	Aitor	0.00	12.53	25.05	36.66
		Mari	17.64	24.07	36.82	43.82
	Eye_Squint_R	Aitor	0.00	12.53	25.05	36.66
		Mari	17.64	24.07	36.82	43.82
	Mouth_Smile	Aitor	35.29	58.23	68.92	85.32
		Mari	43.44	54.74	74.00	84.08
	Mouth_Dimple_L	Aitor	31.07	58.23	68.92	85.32
		Mari	29.77	38.08	58.96	68.12
Mouth_Dimple_R	Aitor	31.07	58.23	68.92	85.32	
	Mari	29.77	38.08	58.96	68.12	
Mouth_Lips_Part	Aitor	22.51	48.02	59.46	82.16	
	Mari	27.87	36.98	58.76	75.41	

TABLE 43.2: Valeurs des blendshapes pour les niveaux de l'expression *Mécontent(e)*

Expression	Blendshape	Personnage	Niv. 1	Niv. 2	Niv. 3	Niv. 4
Mécontent(e)	Brow_Raise_Inner_L	Aitor	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mari	11.20	19.58	21.45	29.01
	Brow_Raise_Inner_R	Aitor	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mari	11.20	19.58	21.45	29.01
	Brow_Drop_L	Aitor	29.56	33.78	58.53	82.61
		Mari	37.29	60.32	65.07	81.49
	Brow_Drop_R	Aitor	29.56	33.78	58.53	82.61
		Mari	37.29	60.32	65.07	81.49
	Mouth_Frown	Aitor	25.50	29.51	52.08	67.60
		Mari	28.56	46.90	50.93	67.19
	Tight	Aitor	4.02	8.04	23.28	37.45
		Mari	14.34	29.18	32.91	44.61
	Nose_Nostril_Flare	Aitor	6.53	13.06	43.56	70.66
		Mari	23.36	52.20	58.27	78.60

TABLE 43.3: Valeurs des blendshapes pour les niveaux de l'expression *En colère*

Expression	Blendshape	Personnage	Niv. 1	Niv. 2	Niv. 3	Niv. 4
En colère	Brow_Raise_Outer_L	Aitor	29.61	38.79	54.06	60.33
		Mari	0.00	26.15	37.85	40.84
	Brow_Raise_Outer_R	Aitor	29.61	38.79	54.06	60.33
		Mari	0.00	26.15	37.85	40.84
	Brow_Drop_L	Aitor	43.58	55.01	76.55	86.78
		Mari	50.80	71.64	81.70	86.54
	Brow_Drop_R	Aitor	43.58	55.01	76.55	86.78
		Mari	50.80	71.64	81.70	86.54
	Eye_Wide_L	Aitor	7.26	10.02	14.31	16.47
		Mari	9.59	13.52	15.38	16.34
	Eye_Wide_R	Aitor	7.26	10.02	14.31	16.47
		Mari	9.59	13.52	15.38	16.34
	Eye_Squint_L	Aitor	29.04	40.08	57.25	65.89
		Mari	38.35	54.09	61.51	65.35
	Eye_Squint_R	Aitor	29.04	40.08	57.25	65.89
		Mari	38.35	54.09	61.51	65.35
	Nose_Scrunch	Aitor	32.21	43.92	64.55	75.04
		Mari	35.39	52.84	63.47	69.73
	Mouth_Top_Lip_Up	Aitor	29.78	40.72	57.14	69.94
		Mari	45.30	60.37	68.85	73.90
	Mouth_Bottom_Lip_Under	Aitor	11.21	26.54	40.17	42.67
		Mari	27.44	42.97	50.39	53.60
	Mouth_Widen	Aitor	0.00	7.64	33.39	39.06
		Mari	0.00	26.86	38.71	41.60
	Tight	Aitor	6.92	15.26	23.67	31.99
		Mari	0.00	0.00	0.00	0.00
	Mouth_Lips_Tuck	Aitor	7.37	16.84	27.57	36.49
		Mari	20.54	30.28	36.95	41.03
CC_Base_JawRoot	Aitor	2.47	6.46	13.22	17.70	
	Mari	4.51	10.18	13.60	15.62	

TABLE 43.4: Valeurs des blendshapes pour les niveaux de l'expression *Surpris(e)*

Expression	Blendshape	Personnage	Niv. 1	Niv. 2	Niv. 3	Niv. 4
Surpris(e)	Brow_Raise_Inner_L	Aitor	39.22	43.42	60.10	85.54
		Mari	43.60	62.84	67.33	80.98
	Brow_Raise_Inner_R	Aitor	39.22	43.42	60.10	85.54
		Mari	43.60	62.84	67.33	80.98
	Brow_Raise_Outer_L	Aitor	37.06	41.21	58.01	87.57
		Mari	36.78	59.15	62.94	79.48
	Brow_Raise_Outer_R	Aitor	37.06	41.21	58.01	87.57
		Mari	36.78	59.15	62.94	79.48
	Eye_Wide_L	Aitor	26.19	30.14	46.29	76.69
		Mari	25.77	47.41	52.09	68.65
	Eye_Wide_R	Aitor	26.19	30.14	46.29	76.69
		Mari	25.77	47.41	52.09	68.65
	Mouth_Bottom_Lip_Down	Aitor	12.21	14.54	24.96	44.09
		Mari	5.08	26.68	29.87	39.84
	Mouth_Widen	Aitor	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mari	0.00	0.00	0.00	11.86
	CC_Base_JawRoot	Aitor	4.87	6.07	11.20	21.80
		Mari	6.04	12.65	14.39	20.69

TABLE 43.5: Valeurs des blendshapes pour les niveaux de l'expression *Sceptique*

Expression	Blendshape	Personnage	Niv. 1	Niv. 2	Niv. 3	Niv. 4
Sceptique	Brow_Drop_L	Aitor	0.00	0.00	17.53	35.07
		Mari	16.52	25.73	36.83	50.03
	Brow_Drop_R	Aitor	44.89	58.15	83.71	95.03
		Mari	44.14	55.01	72.98	88.07
	Mouth_Dimple_L	Aitor	32.71	44.68	66.33	75.88
		Mari	31.65	38.75	50.29	65.90
	Mouth_Bottom_Lip_Under	Aitor	0.00	9.37	45.45	53.41
		Mari	22.18	32.64	41.84	56.15
	Mouth_Top_Lip_Up	Aitor	0.00	4.69	22.72	26.70
		Mari	11.09	16.32	20.92	28.07
	Mouth_Lips_Tuck	Aitor	24.46	35.94	58.28	68.44
		Mari	28.44	36.85	52.96	68.97

Dessins des expressions à partir de la littérature

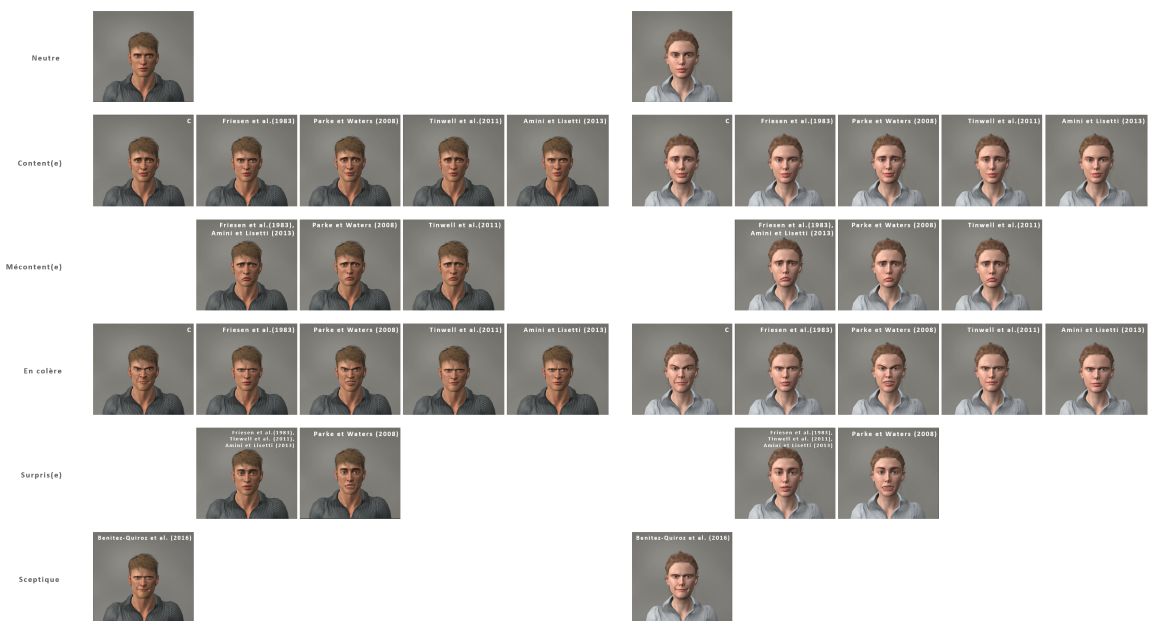


FIGURE 44.1: Dessins des expressions, établis à partir de la littérature

45

**Analyse des Action Units composant les expressions
évaluées comme plus représentatives**

TABLE 45.1: Action Units et intensités à niveau maximal pour l'expression *Content(e)*

Dessin	Action Units							
	1	5	6	7	10	12	14	25
Outil (<i>Happy_7</i>)		$\approx A$			$\approx A$	$\approx D$		$\approx C$
Littérature (C)	E		B	E		E	E	B
Dessin	$\approx B$		$[C; D]$	$[B; C]$		D	$[C; D]$	$\approx D$

Intensités : $A = 15\%$, $B = 30\%$, $C = 55\%$, $D = 85\%$, $E = 100\%$

TABLE 45.2: Action Units et intensités à niveau maximal pour l'expression *Mécontent(e)*

Dessin	Action Units								
	1	4	6	7	10	15	18*	23	38
Outil (<i>Sad_9</i>)	$\approx D$	$[C; D]$	B	$\approx A$	$\approx C$	B	$[B; C]$		
Littérature [60] (Aitor)	E	C				E		E	
Littérature [57, 59] (Mari)	E	C				E			
Dessin	$[0; B]$	$\approx D$				$[C; D]$		$[B; C]$	$[C; D]$

Intensités : $A = 15\%$, $B = 30\%$, $C = 55\%$, $D = 85\%$, $E = 100\%$

[57] : Amini et Lisetti

[60] : Parke et Waters

[59] : Friesen et al.

* AU 18 : Froncement central des lèvres (bouche en cœur)

Dans ce document, nous proposons de reprendre les résultats de l'évaluation des expressions¹.

Pour chaque manière de dessiner une expression retenue, nous analyserons quelles sont les différences d'Action Units pouvant avoir influencé sur la perception de l'expression. Nous chercherons ainsi à avancer des pistes d'explication, permettant d'établir quelles déformations peuvent avoir amené les sujets à considérer les manières de dessiner les expressions comme plus représentatives.

I Expression *Content(e)*

Pour l'expression *Content(e)*, c'est l'expression dessinée par les sujets qui a été jugée comme plus représentative.

Celle-ci ne comporte pas la même composition en Action Units que l'expression proposée en par l'outil (*Happy_7*, Table 45.1).

Elle emprunte en revanche la même composition que l'expression complète (C) dessinée à partir de la littérature. Cependant, elle diffère de par l'intensité des Actions Units. L'AU 1, l'AU 7, l'AU 12 et l'AU 14 sont déformées avec moins d'intensité. L'AU 6 et L'AU 25 sont au contraire plus déformées.

Enfin, l'AU 5 et l'AU 10 ne sont utilisées que pour l'expression proposée par l'outil.

II Expression *Mécontent(e)*

Pour l'expression *Mécontent(e)*, l'expression issue de la littérature a été retenue comme plus représentatives.

Elle a 3 Action Units en commun avec les autres dessins (Table 45.2). L'AU 1 et l'AU 15 sont déformées de manière plus importante, quand l'AU 4 l'est avec moins d'intensité.

En revanche, les dessins issus de la littérature n'utilisent pas de nombreuses Action Units utilisées par l'expression proposée par l'outil. Ils n'utilisent pas non plus l'AU 38 (dilatation des nasaux) employée sur l'expression dessinée par les sujets.

III Expression *En colère*

Pour l'expression *En colère*, les résultats diffèrent selon le personnage. Le dessin issu de la littérature a été sélectionné pour Aitor (Figure 5.25) et celui établi à partir des dessins des sujets l'a été pour Mari.

L'expression issue de la littérature et celle dessinée par les sujets ont en commun de nombreuses Action Units (Table 45.3) : l'AU 2, l'AU 4, l'AU 7, l'AU 9, l'AU 10, l'AU 20 et l'AU 26. À l'exception de l'AU 7, on constate que l'intensité est cependant moins importante sur ces Actions Units, pour l'expression dessinée par les sujets. À noter que l'AU 17, l'AU 23 et l'AU 24 sont utilisées à faible intensité, par cette expression uniquement.

Enfin, d'autres Action Units ne sont utilisées uniquement par les propositions de l'outil : l'AU 5, l'AU 6, l'AU 15, l'AU 16, l'AU 18 et l'AU 22.

1. Voir *Résultats de l'évaluation des expressions*, p.196

TABLE 45.3: Action Units et intensités à niveau maximal pour l'expression *En colère*

Dessin	Action Units										
	2	4	5	6	7	9	10	15	16	17	18*
Outil (<i>Angry_12</i> , Aitor)	$\approx C$		<i>E</i>	<i>E</i>	$\approx C$	$\approx D$	<i>E</i>	$\approx D$	$\approx C$		<i>B</i>
Outil (<i>Angry_8</i> , Mari)			<i>B</i>	[<i>C; D</i>]	<i>B</i>	<i>E</i>	<i>E</i>	<i>B</i>			
Littérature [60]	<i>E</i>	<i>E</i>			<i>B</i>	<i>E</i>	<i>E</i>				
Dessin	[<i>B; D</i>]	<i>D</i>			[<i>C; D</i>]	[<i>C; D</i>]	[<i>C; D</i>]			[<i>B; C</i>]	

Dessin	Action Units				
	20	22**	23	24	26
Outil (<i>Angry_12</i> , Aitor)		$\approx C$			$\approx C$
Outil (<i>Angry_8</i> , Mari)					
Littérature [60]	<i>E</i>				<i>E</i>
Dessin	[<i>B; C</i>]		[0; <i>B</i>]	[<i>B; C</i>]	[<i>B; C</i>]

Intensités : $A = 15\%$, $B = 30\%$, $C = 55\%$, $D = 85\%$, $E = 100\%$

[60] : Parke et Waters

* AU 18 : Froncement central des lèvres (bouche en cœur)

** AU 22 : Lèvres en "O"

TABLE 45.4: Action Units et intensités à niveau maximal pour l'expression *Surpris(e)*

Dessin	Action Units					
	1	2	5	16	20	26
Outil (<i>Surprise_9</i>)	<i>E</i>	<i>E</i>	<i>B</i>			$\approx B$
Littérature [57, 58, 59]	<i>E</i>	<i>E</i>	<i>B</i>			<i>E</i>
Dessin	$\approx D$	$\approx D$	[<i>C; D</i>]	[<i>B; C</i>]	[0; <i>A</i>]	[<i>C; D</i>]

Intensités : $A = 15\%$, $B = 30\%$, $C = 55\%$, $D = 85\%$, $E = 100\%$

[57] : Amini et Lisetti

[58] : Tinwell et al.

[59] : Friesen et al.

IV Expression *Surpris(e)*

Pour l'expression *Surpris(e)*, l'expression dessinée par les sujets a été retenue pour Mari. Pour Aitor, il n'a en revanche pas été possible de la départager de celle proposée par l'outil.

Ces deux représentations retenues utilisent les mêmes AU que celle issue de la littérature : l'AU 1, l'AU 2, l'AU 5 et l'AU 26. Cependant, on remarque qu'elles le font à des intensités différentes (Table 45.3). L'expression dessinée par les sujets utilise l'AU 5 avec plus d'intensité, alors qu'elle déforme les autres Action Units avec moins d'intensité.

Nous notons également que l'expression dessinée par les sujets diffère des deux autres en utilisant l'AU 16 et l'AU 20 à faible intensité.

V Résultats : expression *Sceptique*

Pour l'expression *Sceptique*, c'est également le dessin obtenu à partir de la perception des sujets "dessinateurs" qui a été retenu.

Lorsqu'on analyse les Action Units utilisées par chaque expression, on constate que le dessin issu de la perception des sujets diffère de la proposition de la littérature sur plusieurs aspects (Table 45.3). Sur l'AU 4 et l'AU 14, le dessin déforme le visage avec moins d'intensité mais de manière symétrique. Elle utilise également l'AU 17 avec moins d'intensité. En revanche, l'AU 24 présente une intensité plus importante.

VI Discussions

Nous pouvons expliquer certains de ces résultats obtenus, en analysant les différences des expressions dessinées par les sujets "dessinateurs", dans leur composition en Action Units.

L'expression *Content(e)* dessinée utilise les mêmes Action Units que la proposition issue de la littérature.

Cependant, pour qu'elle soit plus pertinente, les résultats nous amènent à supposer que des ajustements d'intensité sont nécessaires. La remontée de la partie interne des sourcils (AU 1), la tension des paupières (AU 7), l'étirement du coin des lèvres (AU 12) et le plissement externe des lèvres (AU 14) semblent en effet devoir être moins déformés que dans la littérature. A contrario, la remontée des joues (AU 6) et l'ouverture de la bouche (AU 25) paraissent devoir être déformées plus intensément.

TABLE 45.5: Action Units et intensités à niveau maximal pour l'expression *Sceptique*

Dessin	Action Units					
	4L	4R	14L	14R	17	24
Littérature [61]	<i>E</i>	<i>E</i>	<i>E</i>	<i>E</i>	<i>E</i>	<i>B</i>
Dessin	$\approx C$	$\approx D$	$[C; D]$	$[0; C]$	$\approx C$	$[C; D]$

Intensités : $A = 15\%$, $B = 30\%$, $C = 55\%$, $D = 85\%$, $E = 100\%$

[61] : Benitez-Quiroz et al.

Enfin, l'utilisation de l'ouverture de la paupière supérieure (AU 5) et de la remontée de la partie supérieure de la lèvre (AU 10) ne semblent pas pertinentes, puisqu'elles ne sont pas utilisées sur l'expression retenue.

Pour l'expression *En colère*, le dessin obtenu à partir de la perception des sujets partage également un nombre important d'Action Units en commun avec la proposition issue de la littérature.

La remontée de la partie externe des sourcils (AU 2), l'abaissement des sourcils (AU 4), le plissement du nez (AU 9), la remontée de la lèvre supérieure (AU 10), l'étirement externe des lèvres (AU 20) et l'ouverture de la mâchoire (AU 26) semblent nécessiter des déformations moins importantes que celles suggérées par la littérature. En revanche, il apparaît nécessaire de dessiner la tension des paupières (AU 7) avec plus d'intensité.

L'expression issue de la littérature (proposée par Parke et Waters [60]) n'utilise pas certaines Actions Units pourtant présentes pour celle dessinée par nos sujets : l'élévation du menton (AU 17), la tension refermante des lèvres (AU 23) et le pincement des lèvres (AU 24). Il est donc possible que l'utilisation de celles-ci puisse être nécessaire pour obtenir une expression *En colère* pertinente. Cependant, le dessin issu de la littérature ayant été privilégié à celui dessiné par les sujets pour le personnage masculin (Aitor), l'utilisation des ces Actions Units devrait être prise en considération en fonction du personnage.

Enfin, il semble être moins pertinent de déformer l'ouverture de la paupière supérieure (AU 5), la remontée des joues (AU 6), l'abaissement du coin externe des lèvres (AU 15), l'ouverture de la lèvre inférieure (AU 16), le froncement central des lèvres (AU 18) et l'arrondissement des lèvres (AU 22), car ces Action Units sont seulement utilisées par l'expression proposée par l'outil.

La *Surpris(e)* dessinée par les sujets et celle proposée par l'outil ont été retenues, selon le personnage.

Elles ont en commun la remontée de la partie interne des sourcils (AU 1), la remontée de la partie externe des sourcils (AU 2), l'ouverture de la paupière supérieure (AU 5) et l'ouverture de la mâchoire (AU 26).

Cependant, l'expression issue de la littérature utilise aussi ces Actions Units, mais semble avoir été moins bien perçue. Elle diffère de celle proposée par l'outil, par une intensité plus importante de l'ouverture de la mâchoire (AU 26). Il est donc probable que le fait de lui attribuer une intensité trop importante puisse nuire à sa pertinence.

Enfin, l'expression dessinée par les sujets modifie légèrement l'ouverture de la lèvre inférieure (AU 16) et l'étirement externe des lèvres (AU 20), alors que ce n'est pas le cas pour celle proposée par l'outil. Or, il n'a pas été possible de départager ces deux manières de dessiner pour le personnage masculin, alors que celle dessinée par les sujets a semblé plus pertinente pour le personnage féminin (Mari). Il est donc possible que l'utilisation de ces Action Units ne soit pas nécessaire pour garantir la pertinence de l'expression *Surpris(e)* qu'en fonction du personnage.

Pour finir, l'expression *Sceptique* dessinée par les sujets utilise les mêmes Action Units que celle de la littérature.

Cependant, elle diffère en utilisant l'abaissement des sourcils (AU 4) et le plissement externe des lèvres (AU 14) de manière asymétrique. Nous supposons donc que dessiner l'expression de manière symétrique puisse nuire à sa pertinence. De plus les intensités de l'élévation du menton (AU 17) et le pincement des lèvres (AU 24) sont moins importantes pour l'expression dessinée par les sujets. Cela laisse aussi supposer qu'une intensité plus faible sur ces Action Units puisse améliorer sa pertinence.